

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Technische Universität Darmstadt



**Wärmeenergetische Leistungsfähigkeit ausgewählter
Fließgewässer**

Heat energy performance of selected rivers

Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und
beim Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik vorgelegte

Bachelorthesis

von

Jessika Gappisch

aus Flörsheim (Matrikelnummer 2683920)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann

Tag der Einreichung: 29.09.2017

Darmstadt, im September 2017

Jessika Gappisch

jessika.gappisch@web.de

Studiengang: B. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Bachelorarbeit zum Thema:

Wärmeenergetische Leistungsfähigkeit ausgewählter Fließgewässer

Eingereicht: 29. September 2017

Überarbeitete Fassung vom 18.11.2017, veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

Ansprechperson: M.Sc. Steve Borchardt

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt

Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	iv
Abkürzungsverzeichnis.....	v
1 Einführung.....	1
2 Limnologie von Fließgewässern.....	3
2.1 Der Wasserkreislauf	3
2.2 Die physikalischen Eigenschaften des Wassers.....	5
2.3 Der Wärmehaushalt und seine Ableitungen.....	8
2.4 Lebensgemeinschaften und Stoffhaushalt im Gewässer.....	11
3 Wärmelehre	12
3.1 Was ist Wärme?	12
3.2 Wärmeübertragung.....	13
3.2.1 Wärmestrahlung	14
3.2.2 Wärmeleitung	15
3.3 Wärme im Kontext der Wärmepumpe	16
3.4 Wärmemenge und -leistung.....	17
3.5 Mischungs- und Transportprozesse.....	19
3.5.1 Berechnungsansatz nach der Wärmehaushaltsgleichung.....	21
3.5.2 Berechnungsansatz nach der Stoffkonzentration	21
3.5.3 Berechnungsansatz mit verschiedenen Mischungsbereichen	22
4 Einblick Wärmepumpen	25
4.1 Aufbau einer Wärmepumpenheizungsanlage.....	25
4.2 Prinzip der Wärmepumpe.....	27
4.3 Kühlen von Gebäuden	29
4.4 Daten eines potenziellen Wärmetauschers.....	30
5 Auswirkungen von Temperaturänderungen auf das Flusssystem.....	31

5.1	Temperaturerhöhungen	31
5.1.1	Direkte biologische Auswirkungen.....	32
5.1.2	Direkte chemische Auswirkungen.....	34
5.1.3	Sonstige direkte Auswirkungen	35
5.1.4	Indirekte Auswirkungen durch Veränderung des Sauerstoffgehalts.....	35
5.2	Temperaturabsenkungen.....	36
6	Die ausgewählten Fließgewässer - Sachlage	39
6.1	Nidda.....	40
6.2	Wetter.....	41
6.3	Kinzig.....	43
7	Anforderungen an die Fließgewässer.....	45
7.1	Voraussetzungen für die Wärmequelle	45
7.2	Rechtliche Grundlagen (Ökologische Bedingungen)	46
7.2.1	Wasserhaushaltsrechtliche Regelungen	46
7.2.2	Fischgewässerrechtliche Regelungen	48
7.2.3	Empfehlungen für Temperatur- und Sauerstoffgrenzwerte	48
7.2.4	Naturschutzrechtliche Regelungen	49
7.3	Anforderungen durch den Wärmetauscher	49
7.4	Sonstige Anforderungen.....	50
8	Potenzialanalyse.....	52
8.1	Ansatz.....	52
8.2	Erfassung der Daten.....	54
8.3	Berechnungen und Auswertung.....	56
9	Wahl geeigneter Standorte	60
10	Fazit und Ausblick	65
11	Anhang.....	67
	Literaturverzeichnis.....	vii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Züricher Rathaus (Kugler 2013)	1
Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung des Wasserkreislaufs (Bickel und Susanne 2010)	3
Abbildung 3: Wasserhaushalt der Bundesrepublik Deutschland (Maniak 2010)	5
Abbildung 4: Komponenten des Wärmehaushalts (Bellack et al. 2008)	8
Abbildung 5: Arten der Wärmeübertragung: Wärmeleitung (l., m.) und Wärmestrahlung (r.) (Böckh und Wetzel 2011)	14
Abbildung 6: Ausbildung einer Temperaturfahne (DWA 2016)	20
Abbildung 7: Überblick über die Strahleinleitungsmöglichkeiten (DWA 2016)	20
Abbildung 8: Die unterschiedlichen Mischungs- und Transportbereiche (DWA 2016) ..	22
Abbildung 9: Aufbau einer Wärmepumpenheizungsanlage (Sabel)	26
Abbildung 10: Prinzip einer Wärmepumpenanlage (Tholen und Walker-Hertkorn 2008)	28
Abbildung 11: Darstellung des offenen (l.) und geschlossenen Systems (r.)	29
Abbildung 12: Temperaturbereiche des Karpfens (wärmetolerant) (Bellack et al. 2008)	32
Abbildung 13: Überblick über die Lage der Fließgewässer Nidda, Wetter, Kinzig (Weinberger)	39
Abbildung 14: Flussverlauf der Nidda (Weinberger 2017)	40
Abbildung 15: Flussverlauf der Wetter (Weinberger 2017)	42
Abbildung 16: Flussverlauf der Kinzig (Weinberger 2017)	43
Abbildung 17: Modellvorstellung für die Berechnungen	53
Abbildung 18: Wahl der Fließgewässerabschnitte	57
Abbildung 19: Übersicht der Berechnungsergebnisse für die Leistungsfähigkeit	59
Abbildung 20: Standortvorschlag bei Ilbenstadt, Karte: (Weinberger 2017)	62
Abbildung 21: Standortvorschlag bei Bad Vilbel, Karte: (Weinberger 2017)	62
Abbildung 22: Mediathek der Stadt Bad Vilbel (Jehner)	63
Abbildung 23: Standortvorschlag bei Gelnhausen Karte: (Weinberger 2017)	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften des Wassers (Schwoerbel und Brendelberger 2013)	6
Tabelle 2: Vergleich spezifischer Wärmekapazitäten (Hartmann und Schwarzbürger 2009)	18
Tabelle 3: Überblick über mögliche Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf Fische (Bellack et al. 2008)	33
Tabelle 4: Grenzwerte für Salmoniden- und Cyprinidengewässer (Bellack et al. 2008)	48
Tabelle 5: Wichtige Werte für das Wärmepotenzial am Beispiel von Unter-Schmitten..	58

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
FFH	Flora-Fauna-Habitat
FischgewV	Fischgewässerverordnung
HHQ	Höchstes Hochwasser [m^3/s]
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
MHQ	Mittleres Hochwasser [m^3/s]
MNQ	Mittleres Niedrigwasser [m^3/s]
MQ	Mittlere Wasserführung [m^3/s]
NNQ	Niedrigstes Niedrigwasser [m^3/s]
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Formelzeichen

Größe	Bedeutung	Einheit
A	Querschnitt	m^2
B	Wärmeaustausch mit dem Boden	kJ/s
b	Strahlbreite	m
C	Konzentration	kg/m^3
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
D	Himmelsstrahlung	kJ/s
D_{long}	Longitudinaler Dispersionskoeffizient	m^2/s
E	Effektive Ausstrahlung	kJ/s
ET	Evapotranspiration	mm
e	Turbulenter und molekularer Diffusionskoeffizient	m^2/s
F	Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Höhe	m
h_{Fl}	Fließtiefe	m
h_{geom}	Geometrie der Wassermasse	m^3
h_{spez}	Spezifische Enthalpie	kJ/kg
k	Zerfallskonstante	$1/\text{s}$
L	Wärmeaustausch mit der Luft	kJ/s
L_{oN}	Voller Sauerstoffbedarf ohne Nitrifikation	mg/l
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
N	Niederschlag	mm
P	Leistung	kJ/s

p_D	Druck	Pa
P_S	Spezifische Leistungsänderung	$\text{kJ}/(\text{s m}^3)$
Q	Durchfluss	m^3/s
Q_W	Wärmemenge	kJ
\dot{Q}_W	Wärmestrom	kJ/s
S	Direkte Sonnenstrahlung	kJ/s
ΔS	Speicherung	mm
S_{verlauf}	Strahlverlauf	m
T	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
t	Zeit	s
U	Innere Energie	kJ
VK	Verdunstungs-/Kondensationswärme	kJ/s
V	Volumen	m^3
v	Geschwindigkeit	m/s
x	Ortskoordinate in x-Richtung	m
y	Ortskoordinate in y-Richtung	m
y_L	Sauerstoffbedarf	mg/l
z	Ortskoordinate in z-Richtung	m
μ	Dynamische Viskosität	$\text{kg}/(\text{m s})$
ρ	Wasserdichte	kg/m^3
ϕ	Wärmestrom (allg.-mathematisch)	kJ/s

1 Einführung

Wärme ist für den Menschen von großer Bedeutung und spielt gerade in Haushalten eine wichtige Rolle. Sie hat in Deutschland einen Anteil am Endenergieverbrauch von knapp 50 % und liegt damit anteilhaft vor dem Stromverbrauch (Ittershagen 2017). Sie wird sowohl als Raumwärme als auch zur Warmwasserbereitstellung genutzt und in den drei Bereichen private Haushalte, Gewerbe/ Handel/ Dienstleistungen und Industrie verwendet. Die drei Bereiche werden bislang dominiert von Erdgas und Kohle (Ittershagen 2017). Da die Verfügbarkeit fossiler Energieträger weiter sinkt und die CO₂-Emissionen nicht ansteigen sollen, müssen auch im Wärmesektor alternative Energietechniken Eingang finden. Dabei reichen die Möglichkeiten von direkter Sonnenwärme über Erdwärme hin zu Wärme aus Gewässern. Wärmepumpenanlagen sind eine effiziente Variante der Energiebereitstellung; Wärmetauscher entziehen einem Umweltmedium - sei es Luft, Wasser oder dem Erdboden – Wärme von geringem Temperaturniveau, welche in der Wärmepumpe auf ein Niveau gebracht wird, das für Heizzwecke ausreicht. Diese Wärme wird letztlich für die Raum- oder Wasserbeheizung zur Verfügung gestellt. Umgekehrt kann die Wärmepumpe auch zum Kühlen von Gebäuden verwendet werden, sodass die Wärme der Haushalte in das Umweltmedium eingeführt wird.

Oberflächengewässer sind dabei keine zu vernachlässigende Wärmequelle (oder auch -senke). Aufgrund der stetigen Regeneration von Fließgewässern und der hohen Wärmespeicherkapazität von Wasser, können Fließgewässer für eine wärmeenergetische Nutzung geeignet sein.



Abbildung 1: Züricher Rathaus (Kugler 2013)

Eine der weltweit ersten Wärmepumpen ist diejenige des Züricher Rathauses. Durch die wärmeenergetische Nutzung des Fließgewässers Limmat sorgt sie für eine Gebäudebe-

heizung im Winter und eine Gebäudekühlung im Sommer. Dabei kann sie bei einer mittleren Temperaturdifferenz von 5 K zwischen Flusswasser und Einleitungswasser fast 300 MJ Wärme pro Stunde bereitstellen (Kugler 2013).

Dennoch wird die Möglichkeit einer wärmeenergetischen Nutzung von Fließgewässern bislang selten wahrgenommen. In dieser Arbeit soll die wärmeenergetische Leistungsfähigkeit von Fließgewässern - im Speziellen der Nidda, Wetter und Kinzig – und damit einhergehend das wärmeenergetische Potenzial für den Einsatz von Wärmetauschersystemen untersucht werden. Hierfür wird in der vorliegenden Arbeit zunächst die Limnologie von Fließgewässern betrachtet, insbesondere wird der Frage nachgegangen, wie Fließgewässer im Kontext des Wasserkreislaufs und Wärmehaushalts wirken. Zudem wird ein Überblick über die Wärmelehre gegeben, die Grundlage für das Nutzen von Wärme ist. In diesem Zusammenhang wird die verwendete Formel zur Wärmeentzugsleistung erläutert, wie auch verschiedene Ansätze zur Berechnung der Mischungs- und Transportprozesse dargestellt. Vor allem um Wärmetauscher im Fließgewässer thematisch einordnen zu können, wird ein Einblick in das Prinzip einer Wärmepumpenheizungsanlage gegeben. Welche Auswirkungen mit Temperaturänderungen, bedingt durch das gezielte Erwärmen oder Abkühlen von Wassermassen, einhergehen, wird im Anschluss erläutert. Außerdem werden die Fließgewässer, die in der vorliegenden Arbeit betrachtet werden, vorgestellt. Aus den vorangegangenen Kapiteln und darüber hinaus entstehen Anforderungen, die für eine effektive und sichere Nutzung des Fließgewässers beachtet werden sollten; diese werden dargelegt, bevor die eigentliche Potenzialanalyse durchgeführt wird und anschließend geeignete Standorte auf Basis der Anforderungen und Potenziale gewählt werden. Dabei wird nicht nur das größtmögliche Potenzial beachtet, sondern es werden rechtliche, ökologische, ökonomische und funktionale Aspekte berücksichtigt, sodass die potenziellen Standorte möglichst nachhaltig sind.

2 Limnologie von Fließgewässern

Um thematisch in die verschiedenen Aspekte der wärmeenergetischen Nutzung von Fließgewässern einzusteigen, soll zunächst das Gewässer an sich betrachtet werden. Das Gewässer als Komplex von klimatischen, physikalischen, chemischen und biologischen Faktoren bildet dabei Lebensraum für Tiere und Pflanzen, ist aber auch an verschiedenen Kreisläufen der Natur beteiligt.

Mit der Untersuchung der Binnengewässer – wie es auch das Fließgewässer ist – als Ökosystem befasst sich die Limnologie, die sowohl die Struktur als auch den Stoff- und Energiehaushalt der Gewässer erforscht. Ihre unterschiedlichen Aspekte werden in diesem Kapitel vorgestellt.

2.1 Der Wasserkreislauf

Der Wasserkreislauf bezieht sich auf den Transport und die Speicherung von Wasser auf globaler oder auch regionaler Ebene. Er wird sowohl durch die Sonnenenergie als auch durch die Schwerkraft in Bewegung gehalten und beschreibt dabei, wie sich der Ort und auch der Aggregatzustand des Wassers stetig verändert.

Vereinfacht lässt sich der Wasserkreislauf wie folgt visualisieren:

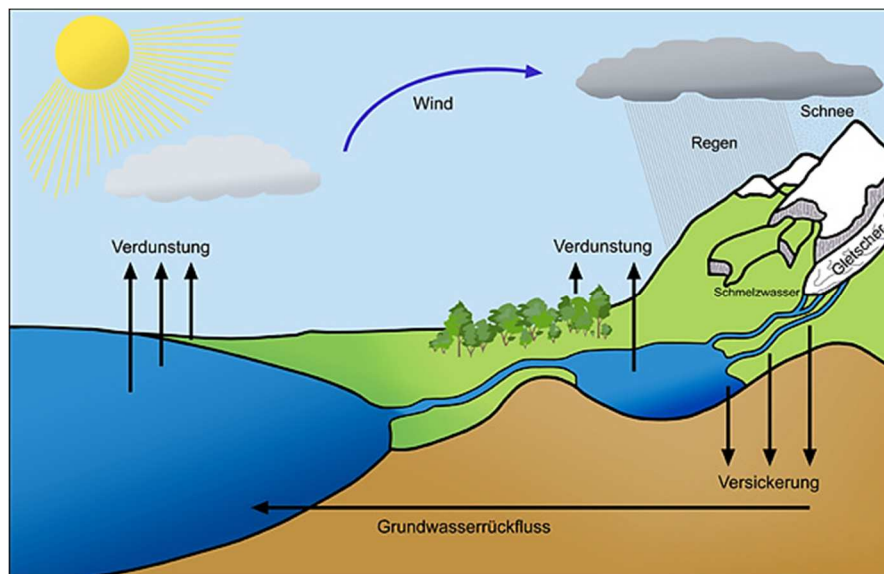


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung des Wasserkreislaufs (Bickel und Susanne 2010)

Dabei verdunstet das Wasser der Ozeane und Festlandflächen (Evapotranspiration). Als Wasserdampf gelangt es in die Atmosphäre, in der dieser wieder kondensiert. Dabei bilden sich Wolken, die gegebenenfalls durch Wind weitertransportiert werden. Das kondensierte Wasser fällt anschließend als Niederschlag auf die Erdoberfläche zurück. Hier wird zwischen dem Anteil unterschieden, der auf das Festland fällt, und dem, der direkt auf die Weltmeere trifft. Ein Teil des auf dem Festland aufgetroffenen Wassers verdunstet direkt; der restliche Niederschlag fließt entweder ober- oder unterirdisch zurück ins Meer. Dort angekommen vermischt sich das Wasser mit dem Meeresniederschlag und –wasser, wird großräumig verteilt und verdunstet schließlich wieder.

In den Weltmeeren befinden sich 97 % der Gesamtwassermenge, dies entspricht circa einer Wassermenge von $1,3 \times 10^9 \text{ km}^3$ (Maniak 2010). Hingegen beläuft sich die Wassermenge der Flüsse auf der Erde lediglich auf etwa 2.000 km^3 , immerhin werden jedoch 40.000 km^3 pro Jahr durch die Fließgewässer weitertransportiert (Schwoerbel und Brendelberger 2013). Limnologisch gesehen stellt dies den entscheidenden Unterschied zu einem See dar: Während Seen einen Teil des festländischen Niederschlags speichern, wird dieser durch Fließgewässer an andere Orte transportiert.

Wird die Zeit betrachtet, in der das Wasser an den unterschiedlichen Stationen komplett erneuert wird, so geht man von einer mittleren Verweildauer von 19 Tagen für den Festlandabfluss aus (Maniak 2010). Dies kann auch mit den hier genannten Werten errechnet werden: Wenn 40.000 km^3 Wasser pro Jahr transportiert werden, sind das umgerechnet auf einen Tag ungefähr 100 km^3 . Um 2.000 km^3 Wasser auszutauschen, müssten also 20 Tage lang die 100 km^3 Wasser transportiert werden.

Das Fließgewässer wird mitunter über seine Transportmenge charakterisiert. Dabei wird es neben der mittleren Wasserführung (MQ) auch durch Angaben zum mittleren Hochwasser (MHQ), höchsten Hochwasser (HHQ), mittleren Niedrigwasser (MNQ) und zum niedrigsten Niedrigwasser (NNQ) beschrieben. Ein Durchflussverhältnis von 1 : 100 zwischen dem NNQ und dem HHQ kann des Öfteren vorkommen (Schwoerbel und Brendelberger 2013).

Kategorisiert man die Elemente des Wasserkreislaufs, so kann zwischen Niederschlag, Verdunstung bzw. Evapotranspiration, Abfluss und Speicherung von Wasser unterschieden werden. Die Wasserhaushaltsgleichung fasst diese Größen in einer Gleichung als Bilanz zwischen ankommendem und abfließendem Wasser zusammen:

$$N = Q + ET \pm \Delta S \quad (1)$$

N: Niederschlag [mm]

ET: Evapotranspiration [mm]

Q: Abfluss bzw. Durchfluss [mm]

 ΔS : Speicherung [mm]

Geht man von dem in Abbildung 2 dargestellten Kreislauf aus und erweitert ihn um die anthropogene Komponente, lässt sich der Wasserhaushalt der Bundesrepublik Deutschland vereinfacht folgendermaßen darstellen:

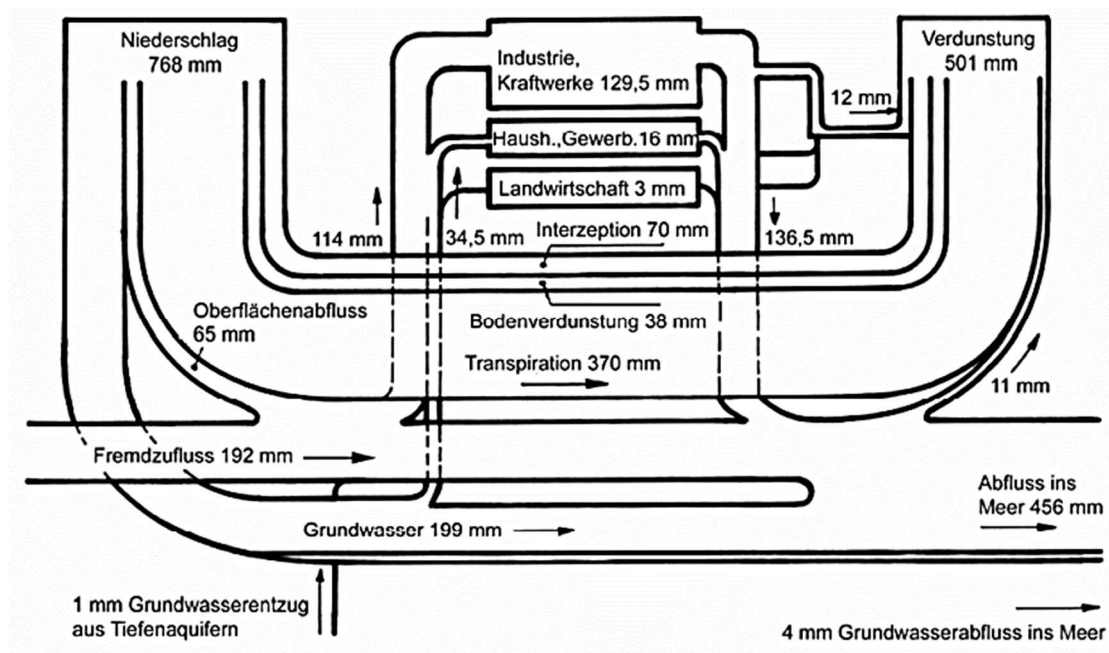


Abbildung 3: Wasserhaushalt der Bundesrepublik Deutschland (Maniak 2010)

2.2 Die physikalischen Eigenschaften des Wassers

Die physikalischen Eigenschaften des Wassers unterscheiden sich teilweise stark von denen anderer Flüssigkeiten. Als Beispiel kann die Dichteanomalie des Wassers angeführt werden, aufgrund derer einzigartige Lebensbedingungen für Wasserbewohner entstehen.

Große Unterschiede zu anderen Stoffen ergeben sich vor allem durch die Struktur der Wassermoleküle und ihrer Neigung, Aggregate zu bilden, bedingt durch die Dipole der Moleküle und der daraus resultierenden Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die grundlegendsten Eigenschaften von Wasser, aus denen die Bedingungen für die Existenz von Einzelorganismen und Biozönosen – Lebensgemeinschaften von Pflanzen und Tieren- abgeleitet werden können.

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften des Wassers (Schwoerbel und Brendelberger 2013)

Größe	Wert
Dichte (25 °C)	997,075 kg/m ³
Dichtemaximum bei	3,98 °C
Viskosität (25 °C)	0,893*10 ⁻³ Pa*s
Schmelzpunkt	0,0 °C
Siedepunkt	100,0 °C
Spezifische Wärmekapazität (15 °C)	4186,0 J/kg
Wärmeleitfähigkeit (25 °C)	0,00569 J/(cm*s*K)

Die aquatischen Lebensgemeinschaften sind adaptive Gruppierungen, die sich an ihre physikalische Umwelt anpassen und mit ihr in Verbindung leben. In erster Linie werden sie von den thermischen Eigenschaften des Wassers und seiner Dichteanomalie geprägt (Schwoerbel und Brendelberger 2013).

Aus der Existenz der Dipole im Molekül bzw. der Wasserstoffbrücken resultiert die uns bekannte Siedetemperatur von 100 °C und Schmelztemperatur von 0 °C. Ohne die starke Anziehung der Moleküle lägen die Temperaturen weitaus niedriger, der Siedepunkt wäre bei circa -80 °C, was eine flüssige Form des Wassers auf der Erde unmöglich machen würde (Schwoerbel und Brendelberger 2013).

Die Dichteanomalie des Wassers – verursacht durch ebendiese Wasserstoffbrücken – lässt sich wie folgt erklären: Wenn das Eis bei Erhöhung der Temperatur schmilzt, wird das Volumen vermindert, indem die lockere Gitterstruktur aufgelöst wird. Ab einer Temperatur von circa 4 °C dominiert die thermische Ausdehnung von Flüssigkeiten das Geschehen; dann nimmt das Volumen mit steigender Temperatur zu. Dieses Phänomen ist ausschlaggebend dafür, dass Gewässer bei gefrierender Kälte von der Oberfläche her zufrieren – bei Fließgewässern ist der Effekt durch ihre Wasserturbulenz nicht so stark, aber dennoch vorhanden. Diese oberflächliche Eisdecke schützt dann die tieferliegenden

Schichten vor dem Gefrieren, sodass im Winter immer noch ausreichend flüssiges Wasser für die Wasserbewohner vorhanden ist. Würden Gewässer in den tiefsten Schichten zuerst gefrieren, wäre das sommerliche Tauen in dem Sinne behindert, als dass die darüber liegenden Wasserschichten die Wärme durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit kaum in die unteren gefrorenen Schichten leiten könnten, um damit das Tauen möglich zu machen.

Auch die Viskosität (dynamische Zähigkeit) ist abhängig von der Temperatur des Gewässers. Sie bezeichnet den Widerstand gegen Formänderungen im Wasser und beruht auf der inneren Reibung. Die kinematische Zähigkeit als Verhältnis von Viskosität zu Dichte – damit auch temperaturabhängig – beschreibt die Reibungskräfte im Wasser, die durch relative Verschiebungen zwischen Wasser und Organismus entstehen. Das bedeutet, dass Organismen in verschieden warmem Wasser unterschiedlich viel Energie aufwenden müssen, um sich zu bewegen. Hier muss ein Fisch im zum Beispiel kalten Wasser zum Schwimmen also mehr Energie aufwenden als in wärmeren Verhältnissen.

Wie in Tabelle 1 zu sehen, liegt die spezifische Wärme von Wasser bei 4,186 kJ/(kg K). Dieser Wert ist hoch, vergleicht man ihn mit den Werten anderer Flüssigkeiten. Hier finden sich nur Ammoniakgas und flüssiger Wasserstoff als flüssige Stoffe, die eine höhere spezifische Wärme aufweisen als Wasser (Schwoerbel und Brendelberger 2013). Dies bedeutet, dass erwärmte Wasserkörper eine hohe Wärmemenge speichern können. Damit besitzen sie ein hohes thermisches Puffervermögen gegenüber Temperaturschwankungen über den Tag oder das Jahr hinweg und bieten dadurch einen thermisch relativ ausgeglichenen Lebensraum.

Für den Wärmehaushalt weiterhin relevant ist die bereits angesprochene Eigenschaft einer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit (0,00569 J/(cm s K)). Der molekulare Wärmetransport ist somit vernachlässigbar klein, was bedeutet, dass ein Wärmetransport fast ausschließlich über Wasserbewegungen erfolgt. Diese Eigenschaft muss bei der Wärmeübertragung auf eine Wärmepumpe beachtet werden.

Der Wärmehaushalt im Gewässer spielt im Hinblick auf die Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern eine große Rolle. Dieser wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

2.3 Der Wärmehaushalt und seine Ableitungen

Grundsätzlich wichtige physikalische Faktoren, die die biologische Strukturierung und damit den gesamten Stoffhaushalt des Gewässers bedingen, finden sich im Strahlungsklima, in den Bewegungs- und Austauschvorgängen wie auch im Wärmehaushalt. In diesem Kapitel liegt der Fokus auf dem Wärmehaushalt.

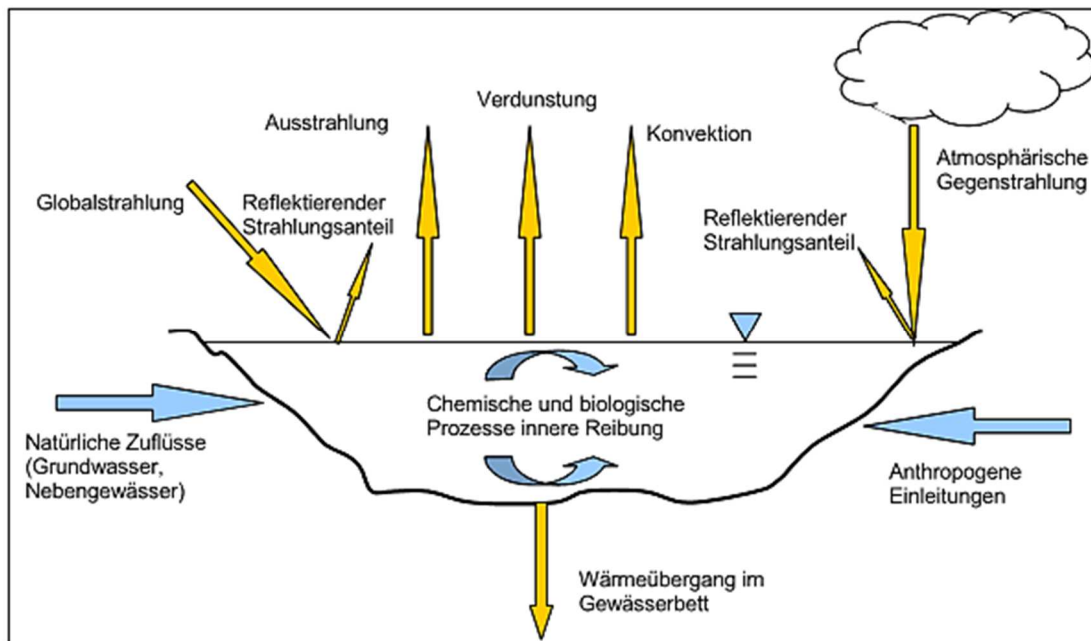


Abbildung 4: Komponenten des Wärmehaushalts (Bellack et al. 2008)

Ein Wärmehaushalt setzt sich zusammen aus der Wärmeaufnahme, -verteilung und schließlich der -abgabe. Der eines Fließgewässers wird in Abbildung 4 gezeigt. In einem Wasserkörper erfolgt die Wärmeaufnahme aus der Atmosphäre, d.h. dass Strahlungsenergie in die obersten Wasserschichten absorbiert wird. Verteilt wird die Wärmeenergie horizontal entlang der Strömung und vertikal fast ausschließlich durch Verfrachtung erwärmter Wasserkörper in tieferliegende Wasserschichten. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit wird hier Wärme größtenteils durch mechanische Arbeit transportiert. So wie die Wärme anfangs von der Atmosphäre aufgenommen wird, wird sie schließlich auch wieder an sie abgegeben, indem Wärme abgestrahlt wird oder Wasser verdunstet (Schwoerbel und Brendelberger 2013).

Zur Beschreibung des Wärmehaushalts können zwei Gleichungen herangezogen werden. Zum einen kann der Wärmehaushalt in Form der Temperaturänderung dT/dt , zum anderen über die zeitliche Änderung der Wärme im Fließgewässer beschrieben werden.

1) Der Wärmehaushalt eines Fließgewässers als Temperaturänderung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Einerseits wird der Wärmehaushalt von den *Eigenschaften des Wasserkörpers* beeinflusst (Geometrie, Dichte, spezifische Wärmekapazität), andererseits nehmen die Faktoren des *Wärmeaustauschs* mit der Atmosphäre Einfluss (Schwoerbel und Brendelberger 2013). Die Wassertemperaturänderung pro Zeit kann - für gemäßigte Klimate - ausgedrückt werden durch den folgenden mathematischen Zusammenhang (Schwoerbel und Brendelberger 2013):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{h_{geom} \times \rho \times c_p} (S + D - E \pm VK \pm L \pm B) \quad (2)$$

dT/dt : Temperaturänderung [K/s]

h_{geom} : Geometrie der Wassermasse [m^3]

ρ : Wasserdichte [kg/m^3]

c_p : spezifische Wärmekapazität v. Wasser [$kJ/(kg \cdot K)$]

S: Direkte Sonnenstrahlung [kJ/s]

D: Himmelsstrahlung [kJ/s]

E: Effektive Ausstrahlung [kJ/s]

VK: Verdunstungs-/Kondensationswärme [kJ/s]

L: Wärmeaustausch mit der Luft [kJ/s]

B: Wärmeaustausch mit dem Boden [kJ/s]

Aus der Gleichung folgt zum einen, dass die Temperaturänderungen ansteigen, sobald die Wassertiefe abnimmt. Ein Fließgewässer ist thermisch also ausgeglichener, wenn es tiefer ist. Die zweite Erkenntnis aus dem mathematischen Zusammenhang ist: Je geringer die Gewässertemperaturen im Sommer im Vergleich zur Lufttemperatur sind, desto positiv größere Werte haben der Wärmeaustausch mit der Luft (L) und der mit dem Boden (B). Die Temperaturschwankungen steigen in diesem Fall an. Deswegen ist ein Fließgewässer meist im quellnahen Bereich anfälliger für Temperaturschwankungen als in seinem späteren Verlauf: Zunächst tritt es mit meist kühlen Quelltemperaturen (Grundwassertemperaturen) an die Oberfläche. Tagsüber nimmt das Gewässer viel Wärme auf, nachts gibt es wieder Wärme ab, kühlt allerdings nicht wieder vollständig auf die Ausgangstemperatur ab. Das bedeutet, das Fließgewässer nimmt quellwärts im Durchschnitt Wärme auf. Wenn sich die Quelltemperaturen nicht mehr auswirken, kann von einer ausgeglichenen Wärmebilanz gesprochen werden, die lediglich von Aus- und Einstrahlung abhängt (Schwoerbel und Brendelberger 2013).

Der Temperaturverlauf – sei er nicht von anderen äußeren Quellen gestört – lässt sich also von einigen grundlegenden Fakten herleiten:

- Die konstantesten Temperaturen sind an der Quelle selbst zu finden.
- Die sommerliche Mitteltemperatur nimmt flussabwärts zu.

- Die Temperaturveränderung wird wie schon dargestellt hingegen geringer. Die Fließgewässerstrecken gleicher Temperatur werden länger. Dabei gilt für die Temperatur nach einer Fließstrecke z : $T = T_0 + c \times \log(1 + z)$ bzw. $\frac{dT}{dz} = \frac{c}{1+z}$ mit T_0 : Ausgangstemperatur (Schwoerbel und Brendelberger 2013).
- Die mittleren Wassertemperaturen sind beeinflusst durch die mittleren Lufttemperaturen.
- Die sommerlichen Tages-Höchsttemperaturen nehmen von der Quelle ausgehend zunächst zu, verringern sich dann jedoch wieder. Dieses Phänomen tritt aufgrund zwei verschiedener Prozesse auf. Zunächst sind die Temperaturunterschiede sehr groß, das Fließgewässer hat kühle Grundwassertemperaturen und kann entsprechend nicht so rasch so stark aufgeheizt werden. Je wärmer das Fließgewässer flussabwärts wird, desto höher können also auch die Spitzentemperaturen werden. Entgegengesetzt dazu nehmen flussabwärts Wassermasse und -tiefe zu, sodass Temperaturschwankungen und Peaks vermindert werden.
- Die Jahres-Höchsttemperaturen nehmen ebenfalls flussabwärts zu, gleichbleibendes Klimagebiet vorausgesetzt.

2) Der Wärmehaushalt als Energiestrom lässt sich aus Energiebetrachtungen ableiten: einem festen Flussabschnitt wird durch die eintretende Wassermasse Energie in Form von Enthalpie (innere Energie U und Verdrängungsarbeit (Druck pro Dichte)), mechanischer Energie (kinetische und potenzielle Energie) sowie thermischer Energie zugeführt (Maniak 2010). Es gilt, dass die Leistungsbeträge des Eintrittsquerschnitts (Querschnitt 1) des festen Flussabschnittes denen des Austrittsquerschnitts (Querschnitt 2) gleichen. Werden also alle Energiebeiträge mit dem Massenstrom ρQ multipliziert, so gilt die Gleichung (Maniak 2010):

$$\rho Q (h_{spez,1} + 0,5v_1^2 + gz_1) + \phi = \rho Q (h_{spez,2} + 0,5v_2^2 + gz_2) \quad (3)$$

ρQ : Massenstrom [kg/s]

gz : potenzielle Energie [kJ/kg]

h_{spez} : spezif. Enthalpie [kJ/kg]

ϕ : Wärmestrom (allg.-math.) [kJ/s]

$0,5v^2$: kinetische Energie [kJ/kg]

Es kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb des Fließgewässerabschnitts sowohl die Fließgeschwindigkeit als auch der Druck unverändert bleiben (Maniak 2010), wodurch sowohl die Verdrängungsleistung als auch die kinetische Leistung aus der Gleichung fallen. Formt man die Gleichung nun so um, dass auf der rechten Seite die Kom-

ponenten der Temperaturänderung und auf der linken Seite die restlichen Anteile stehen, so ergibt sich:

$$\phi - \rho Q(z_2 - z_1) = \rho Q(U_2 - U_1) \quad (4)$$

Da der Höhenunterschied $z_2 - z_1$ relativ gesehen sehr klein ist, kann dieser vernachlässigt werden. Der Wärmestrom setzt sich zusammen aus den Wärmeströmen infolge Strahlung, Verdunstung, Konvektion und ggf. Kühlwasser. Mit $\phi = \phi_{SB} + \phi_V + \phi_K + \phi_{Kü} = P$ und $U = c_p T$ kann die Wärmehaushaltsgleichung also beschrieben werden durch:

$$P = \rho Q(U_2 - U_1) = \rho Q c_p (T_2 - T_1) = \rho Q c_p \Delta T. \quad (5)$$

2.4 Lebensgemeinschaften und Stoffhaushalt im Gewässer

Unter den Bedingungen, die in einem Fließgewässer aufgrund der Wassereigenschaften, der kurzen Verweilzeit des Wassers und der großen Uferentwicklung zustande kommen, siedeln sich daran angepasste Lebewesen an; die Artenvielfalt ist groß. Interessant für die hier vorliegende Arbeit ist der Fakt, dass die Qualität und Möglichkeit des Lebens im Fließgewässer von der Temperatur abhängt; welche Arten im Allgemeinen in Fließgewässern zu finden sind, sind zum Nachlesen in Anlage 1 zu finden.

Auch der Stoffhaushalt von Fließgewässern beeinflusst seine Lebensbedingungen und ist geprägt durch die geochemische, pedologische und ökologische Struktur des Einzugsgebiets. Insbesondere kleinere Fließgewässer spiegeln die geochemische Situation des Einzugsgebiets wieder und lassen sich entsprechend in Geochemotypen unterteilen (Schwoerbel und Brendelberger 2013). Hauptsächlich beeinflussen Lösungsvorgänge, Verdunstung und ihre induzierten Ausfällungen, Adsorption und Desorption von Schwebstoffen und Sedimenten, gewässerinterne Umsätze sowie der Austausch mit der Atmosphäre das chemische Geschehen im Wasser (Schwoerbel und Brendelberger 2013).

3 Wärmelehre

Um Wärme im Kontext der wärmeenergetischen Leistungsfähigkeit einordnen zu können, werden zunächst die Fragen danach gestellt, was Wärme grundsätzlich überhaupt ist, wie sie übertragen werden kann, wie sie im System einer Wärmepumpe wirkt und wie man schließlich ihre Menge bestimmen kann.

3.1 Was ist Wärme?

Was ist also Wärme ganz grundsätzlich? Für Wärme gibt es in der Thermodynamik zwei sich gegenüberstehende Vorstellungen.

Zum einen kennzeichnet Wärme in der Thermodynamik den inneren *Energiezustand* von Materie. Sie beschreibt die Brown'sche Molekularbewegung der Atome und Moleküle – im Verband oder in freier Bewegung - und wird dabei in Grad Celsius (°C) oder Kelvin (K) angegeben. Die Bewegung der Moleküle endet erst am absoluten Nullpunkt, sprich 0 K bzw. -273,15 °C. Für wärmeenergetische Fließgewässernutzung und allgemein Heizzwecke relevante Größenordnungen spielen sich jedoch nicht am Nullpunkt ab, sondern im Bereich von flüssigem Wasser und dem menschlichen Wärmeempfinden: das bedeutet zwischen dem Gefrierpunkt des Wassers (0 °C) und seinem Siedepunkt (100 °C).

Entgegengesetzt der Vorstellung, Wärme beschreibe einen Energiezustand bzw. sei eine Energieform, kann Wärme in der Thermodynamik auch als *Energietransportform* über eine thermodynamische Systemgrenze gesehen werden (Herwig und Moschallski 2009). Dieser Ansicht nach kennzeichnet Wärme eine Form, in der Energie über eine Systemgrenze gelangt – neben Wärme gilt Arbeit als die zweite Energietransportform (Herwig und Moschallski 2009). Wärmeübertragung würde in dem Sinne nicht bedeuten, dass Wärme von einem System auf ein anderes übertragen wird, sich die Wärme des einen Systems also erhöht, sondern, dass mittels Wärme Energie von einem System auf das andere übertragen wird und sich also die Energie des einen Systems erhöht.

Da die Vorstellung, dass Wärme einen Energiezustand beschreibt und sie von einem System auf ein anderes übertragen werden kann, anschaulicher ist und viele Phänomene mit diesem Modell beschrieben werden, wird in dieser Arbeit mit ebendieser Vorstellung gearbeitet.

Die ersten beiden Hauptsätze der Thermodynamik lassen Ableitungen auch für Wärme - als Energieform - zu (Hartmann und Schwarzbürger 2009). Dabei besagt der erste Hauptsatz der Thermodynamik, dass die Summe aller Energien in einem abgeschlossenen System konstant ist. Der zweite Hauptsatz kennzeichnet die Richtung natürlicher Prozesse der Energieübertragung. Er besagt, dass Wärme nicht von selbst von einem Körper niedrigerer Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen kann, hierfür also immer ein Arbeitsaufwand notwendig ist (Waldschmidt 2007). Zudem ist postuliert, dass (mechanische) Arbeit vollständig in Wärme umgewandelt werden kann, der Vorgang umgekehrt allerdings nur begrenzt möglich ist. Ableitungen, die sich hieraus ergeben und für den Heizbetrieb relevant sind, sind dabei folgende (Hartmann und Schwarzbürger 2009):

- Wärme geht nicht eigenständig von einem kalten auf einen warmen Körper über.
- Es ist nicht möglich, einem Medium Wärme zu entziehen und sie in Arbeit umzuwandeln, ohne dass weitere Veränderungen im Medium stattfinden.
- Um Wärmeenergie in Arbeit umzuwandeln, ist immer ein Temperaturgradient notwendig und es kann nur ein Teil der Wärme in Arbeit umgewandelt werden.

Wärme im Kontext der Gebäudebeheizung bedeutet nun: Ein im Vergleich zur Außentemperatur warmer Raum verliert immer teilweise seine Wärme dadurch, dass seine umgebenden Wände wärmedurchlässig sind. Um ihn auf konstanter Temperatur zu halten, muss ebendiese Wärme, die über Wände verloren geht, an anderer Stelle wieder zugeführt werden. Dies geschieht durch Heizen; ein Heizkörper gibt Wärme an seine Umgebung ab.

3.2 Wärmeübertragung

Bekannt ist nun, was Wärme ist und dass sie zum Heizen eingesetzt wird. Wie die Wärme hierbei übertragen wird, wird im Folgenden beschrieben.

Die Wärmeübertragung als Teilgebiet der Wärmelehre beschreibt die Gesetzmäßigkeiten, nach denen der Transport von Wärme erfolgt. Der Wärmestrom ist dabei eine Prozessgröße, die angibt, wie viel Wärme pro Zeiteinheit zwischen zwei Systemen übertragen wird. Ein System ist ein Stoff, ein Körper oder eine Kombination mehrerer Stoffe und Körper, der Wärme zu einem anderen System transferiert oder von dort Wärme

erhält. Die zwei Systeme, zwischen denen die Wärme transportiert wird, müssen unterschiedliche Temperaturen aufweisen.

Eine Wärmeübertragung findet beispielsweise in Heizungsanlagen, solarthermischen Systemen und Wärmepumpen statt. Sie kann in verschiedene Arten unterteilt werden. Dabei tauchen die Begriffe Wärmeleitung, freie und erzwungene Konvektion sowie Wärmestrahlung auf. Tatsächlich sind diese Begriffe den zwei Wärmeübertragungsarten Strahlung und Leitung zuzuordnen. Die Konvektion, die ohne Leitung nicht bestünde, gehört demnach in die Kategorie der Wärmeleitung (Böckh und Wetzel 2011). Abbildung 5 veranschaulicht die beiden Arten der Wärmeübertragung:

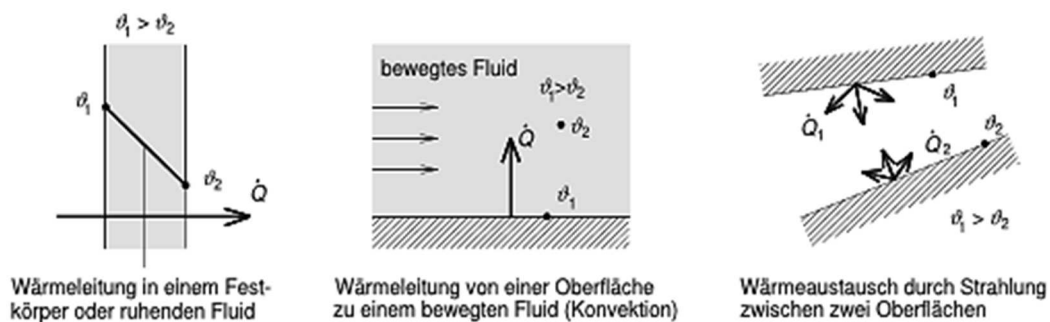


Abbildung 5: Arten der Wärmeübertragung: Wärmeleitung (l., m.) und Wärmestrahlung (r.) (Böckh und Wetzel 2011)

Die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m*K)] ist ein Maß dafür, wie viel Wärme pro Zeit in einem Medium übertragen wird, und ist abhängig von Temperaturdifferenz und Schichtdicke. Konkret gibt sie an, welcher Wärmestrom bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin durch eine 1 m dicke Schicht eines Stoffes übertragen wird. Während Metalle eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit haben, weisen Flüssigkeiten eine eher geringe auf.

3.2.1 Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist eine Art der Wärmeübertragung, bei der Wärme durch elektromagnetische Wellen im Infrarotbereich entweder auf die Umgebung oder zwischen zwei Körpern übertragen wird. Die Wärmeübertragung ist in strahlungsdurchlässigen Medien möglich. Beispielsweise sind Wärmestrahlen in der Lage, durch Vakuum hindurchzugehen, da sie an keine stoffliche Materie gebunden sind. Der Wärmestrom ist dabei umso größer, je größer die Temperaturdifferenz ist. Die Menge der ausgetauschten Strahlungswärme ist auch davon abhängig, wie stark der eine Körper strahlt und der andere

Strahlungswärme aufnehmen bzw. absorbieren kann - dunkle Flächen absorbieren, während helle Flächen reflektieren.

Wärmestrahlung nimmt mit der Größe der abgestrahlten Fläche (Flächenintegral) zu, das bedeutet, dass eine Fläche, wenn sie denn groß ist, schon bei einer geringen Temperaturdifferenz eine erhebliche Wärmemenge abstrahlt (Hartmann und Schwarzbürger 2009). Dieses Prinzip machen sich beispielsweise Fußbodenheizungen oder Heizflächen an den Innenwänden zunutze. Sie erzielen auch bei relativ geringen Temperaturdifferenzen durch ihre großen Flächen mittels Strahlung den erforderlichen Wärmestrom. Da die Wärmepumpe mit relativ geringen Vorlauftemperaturen und Temperaturdifferenzen arbeitet, kann sie in solchen Fällen effektiv eingesetzt werden.

3.2.2 Wärmeleitung

Wärmeleitung ist eine Form der Wärmeübertragung, die innerhalb von Stoffen stattfindet, sobald ein Temperaturgradient vorhanden ist. Unterschieden wird zwischen der reinen Wärmeleitung und Konvektion. Die reine Wärmeleitung ist die Wärmeübertragung in ruhenden Stoffen (d.h. Feststoffe oder ruhende Fluide), die lediglich vom Temperaturgradienten und den Stoffeigenschaften abhängig ist.

Konvektion tritt auf, wenn Wärme zwischen fester Oberfläche und strömendem Fluid übertragen wird und ist immer mit einem Stofftransport (Massestrom) verbunden. Konvektion kann als Wärmeströmung angesehen werden; hier wird die Wärme als innere Energie (Enthalpie) vom strömenden Fluid mitgenommen (Hartmann und Schwarzbürger 2009). Bei der Wärmeübertragung zwischen fester Oberfläche und strömendem Fluid treten dabei zwei Effekte auf: Der direkte Wärmeaustausch von Oberfläche und Fluid erfolgt durch Leitung, die Vermischung innerhalb des Fluids wird durch Übertragung der Enthalpie gewährleistet. Dieser zweite Effekt dominiert im Fließgewässer, da hier die Wärme fast ausschließlich innerhalb des Wassers und aufgrund seiner strömenden Bewegung übertragen wird.

Differenziert wird zwischen freier und erzwungener Konvektion. Bei freier Konvektion wird die Strömung durch Temperatur- und damit verbundene Dichteunterschiede erzeugt, durch äußeren Druck hingegen entsteht die Strömung bei erzwungener Konvektion.

Die Prinzipien können am Beispiel des Heizkörpers veranschaulicht werden: Das warme Wasser im Heizkörper führt seine Wärme als Enthalpie mit und gibt diese durch Wärme-

leitung bei freier oder erzwungener Konvektion an die Innenwand des Körpers ab. Durch die Wand bis hin zur Außenseite des Heizkörpers wird die Wärme durch reine Wärmeleitung übertragen und schließlich bei freier Konvektion und auch Strahlung an den Raum abgegeben.

3.3 Wärme im Kontext der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe ist eines der entscheidenden Glieder in der Kette von dem Vorhandensein der Wärme im Fließgewässer bis hin zur Wärmenutzung im Haushalt. Sie macht sich verschiedene Effekte aus der Wärmelehre zunutze. Dabei spielen die verschiedenen Aggregatzustände (fest, flüssig, gasförmig) von Stoffen eine Rolle, vor allem aber das Prinzip der Umwandlungsenthalpie.

Umwandlungsenthalpie umfasst allgemein die Begriffe Verdampfungs-, Schmelz-, Erstarrungs- und Kondensationsenthalpie und beschreibt diejenige Wärmemenge, die bei Phasenumwandlungen (Änderung des Aggregatzustandes) aufgewendet oder abgegeben wird. In der Wirkungsweise von Wärmepumpen spielen sowohl die Verdampfungs- als auch die Kondensationsenthalpie eine Rolle.

Verdampfungsenthalpie beschreibt das Phänomen, dass nicht allein das Erreichen der Siedetemperatur notwendig ist, um einen Stoff zu verdampfen. Es ist weitere Energie notwendig, bis sich der Aggregatzustand schließlich ändert. Zur vollständigen Verdampfung von z.B. Wasser ist dieselbe Wärmemenge erforderlich, die es braucht, um die Wassermenge von 0 auf 100 °C zu erhitzen. Besonders ist hierbei, dass die Temperatur des Wasser-Dampf-Gemisches während der Verdampfung konstant bleibt. Erst nach Abschluss der Verdampfung kann die Temperatur wieder ansteigen. Umgekehrt gilt der Vorgang auch für die Verflüssigung von Dampf (Kondensationsenthalpie). Kühlt Dampf soweit ab, dass er den Taupunkt erreicht, so gibt er solange thermische Energie (Wärme) ab, bis der Dampf vollständig kondensiert ist. Während dieser Zeit bleibt die Temperatur des Stoffs konstant und kann erst weiter sinken, wenn der Stoff komplett kondensiert ist.

Dieser Effekt ermöglicht es, Wärme von einem Wärmeträgermedium freizusetzen, und ebendieser wird von der Wärmepumpe genutzt. Dabei sorgt der Verdichter der Wärmepumpe dafür, dass das Wärmeträgermedium verdampft. Bei der anschließenden Ver-

flüssigung wird nutzbare Wärme frei (Kondensationsenthalpie), die an den Heizkreis übertragen wird.

Damit bietet die Wärmepumpe eine energetisch effizientere Alternative zur Verbrennungstechnik: bei dieser wird ein Brennstoff wie Kohle oder Heizöl bei bis zu 1000 °C verbrannt, wobei im Endeffekt etwa 65 °C im Vorlauf der Heizungsanlage benötigt werden; aus Sicht von (Hartmann und Schwarzbürger 2009) eine „thermodynamische Verschwendung“, die beispielsweise durch den Einsatz von Wärmepumpen vermieden werden kann.

3.4 Wärmemenge und -leistung

Um die wichtigsten Begriffe in Bezug auf die Wärmeenergetische Leistung voneinander abzugrenzen, werden zunächst ihre Definitionen vorgestellt.

- Dabei gibt die Wärmeenergetische Leistung, der sogenannte Wärmestrom ϕ , an, wie viel thermische Energie pro Zeiteinheit über eine Systemgrenze übertragen wird (Prozessgröße).
- Die thermische Energie bzw. die Wärmemenge Q_W ist definiert als die Energiemenge, die in der ungeordneten Bewegung der Atome respektive Moleküle eines Stoffes gespeichert ist (Zustandsgröße). Sie wird beschrieben durch

$$Q_W = m c_p \Delta T \quad (6)$$

Q_W : Wärmemenge [kJ]

c_p : spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg K)]

m : Masse [kg]

T : Temperaturdifferenz [K]

- Das in der Formel postulierte ΔT stellt die Temperaturdifferenz dar. Dabei wird die Temperatur allgemein (Wärmezustand) durch die kinetische Energie der Moleküle definiert.
- Das in der Formel verwendete c_p stellt die spezifische Wärmekapazität dar, die die Wärmemenge angibt, die einem Stoff pro Kilogramm zugeführt werden muss, um seine Temperatur um 1 K zu erhöhen. Der Wert gibt umgekehrt aber auch an, wie viel Wärmeenergie abgegeben wird, wenn das Wasser pro Kilogramm um 1 K abgekühlt wird.

In der folgenden Tabelle wird die spezifische Wärmekapazität von Wasser im Vergleich zu Werten anderer Stoffe darstellt. Hieraus ist zu erahnen, dass Wasser in der Lage ist,

vergleichsweise viel Wärme zu speichern, sodass pro Kilogramm und Grad Celsius vergleichsweise viel Wärmemenge abgegeben werden kann (Hartmann und Schwarzbürger 2009).

Tabelle 2: Vergleich spezifischer Wärmekapazitäten (Hartmann und Schwarzbürger 2009)

Stoffart	Wasser	Luft	Blei	Holz	Fensterglas	Beton
c_p [kJ/kgK]	4,19	1,01	0,13	2,39	0,17	0,92

Um die Formel zur Berechnung der wärmeenergetischen Leistung in Fließgewässern zu ermitteln, verwenden wir die angesprochenen Größen. Dabei gilt für den Wärmestrom allgemein $\phi = \dot{Q}_W$, sodass mit $Q_W = mc_p\Delta T$ dann $\phi = \dot{m}c_p\Delta T$ gilt. Meist ist die Umformung $\dot{Q}_W = \frac{Q_W}{t}$ zulässig. Um zu überprüfen, ob dies auch für Fließgewässer gilt, wird nun die Herleitung der Formel erarbeitet. Zurückzuführen ist der mathematische Zusammenhang $\phi = \dot{m}c_p\Delta T$ auf die Energiebilanzgleichung. Diese kann verwendet werden, da bei Wärmeübertragung der in Kapitel 3.1 angesprochene erste Hauptsatz der Thermodynamik gilt (Böckh und Wetzel 2011). In der Bilanzgleichung setzt sich die Änderung der Energie im Kontrollraum zusammen aus der Änderung der Wärmemenge des Kontrollvolumens (Wärmestrom $\dot{Q}_{W,KV}$) und dem hinein- und dem hinausströmenden Massenstrom. Bei der Wärmeübertragung können sowohl die mechanische Arbeit als auch die Änderung der potenziellen Energie vernachlässigt werden. Damit folgt zunächst:

$$\frac{dE_{KV}}{dt} = \dot{Q}_{W,KV} + \Sigma \dot{m}_e h_{spez,e} - \Sigma \dot{m}_a h_{spez,a} \quad (7)$$

dE_{KV}/dt : Änderung der Energie des Kontrollvolumens [kJ/s]

\dot{Q}_{KV} : Wärmestrom im KV [kJ/s]

\dot{m}_e : einkommender Massenstrom [kg/s]

\dot{m}_a : ausgehender Massenstrom [kg/s]

h_{spez} : spezifische Enthalpie [kJ/kg]

Bei Fragestellungen zur Wärmeübertragung wird meist von nur einem Massenstrom ausgegangen, der in das System hinein- und aus dem System herausfließt (Böckh und Wetzel 2011). Entsprechend vereinfachen sich die Terme zum Massenstrom. Der Wärmestrom $\dot{Q}_{W,KV}$ kann über die Systemgrenzen des Kontrollraums hinzu- oder abgeführt werden und/oder als Wärmestrom einer Wärmequelle innerhalb des Kontrollraums fließen. Passt man die Gleichung an die Folgerungen an, so folgt:

$$\frac{dE_{KV}}{dt} = \dot{Q}_{W,12} + \dot{Q}_{W,WQ} + \dot{m}(h_{spez,1} - h_{spez,2}) \quad (8)$$

1: Anfang des Kontrollvolumens

2: Ende des Kontrollvolumens

$\dot{Q}_{W,WQ}$: Wärmestrom einer Wärmequelle
im Kontrollvolumen [kJ/s]

Gehen wir im Fließgewässer von stationären Vorgängen aus, so können wir sagen, dass sich die Energie im Kontrollraum nicht verändert, der linke Term also Null gesetzt werden kann (Böckh und Wetzel 2011). Ein stationärer Vorgang ist ein Vorgang, der sich nach einer äußeren Anregung (zum Beispiel Wärmeentzug) einstellt und sich anschließend über die Zeit hinweg nicht ändert. Dies wird vor allem dadurch gewährleistet, dass es keine zusätzliche – gegebenenfalls über die Zeit schwankende - Wärmequelle im Kontrollraum gibt ($\dot{Q}_{W,WQ} = 0$). Damit vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$\dot{Q}_{W,12} = \dot{m}(h_{spez,2} - h_{spez,1}) = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) \quad (9)$$

Da $h_{spez} = c_p T$ gilt, entspricht Gleichung 9 genau der zuvor postulierten Formel. Entsprechend kann also die Wärmeenergetische Leistungsfähigkeit von Fließgewässern mit jener Formel ermittelt werden.

3.5 Mischungs- und Transportprozesse

Punktförmige Wärmeeinleitungen durchmischen sich nicht direkt vollständig, sondern ziehen einen langen und komplexen Prozess der Durchmischung mit sich. In diesem Kapitel wird der Prozess sowohl qualitativ als auch quantitativ beschrieben, indem verschiedene Berechnungsansätze vorgestellt werden.

Vereinfacht ändern Fließgewässer im Längsverlauf kontinuierlich ihre Temperatur. Während die Wassertemperaturen im Quellbereich denen des Grundwassers entsprechen, nehmen sie mit zunehmender Fließlänge zu. Auch die Jahres- und Tagesamplituden steigen an. Im Fließquerschnitt hingegen können sich unterschiedliche Temperaturbereiche bzw. -fahnen ausbilden, die über den Längsverlauf hin zunehmen (Bellack et al. 2008). Diese Temperaturfahnen sind Folge beispielsweise von Flusseinmündungen oder – unter anthropogenem Einfluss – von Einleitungen. Sie entstehen, da das wärmere Einleitungswasser eine verminderte Dichte hat und sich entsprechend an der Oberfläche des Gewässers ausbreitet. Das wärmere Wasser mischt sich nur langsam mit dem umgebenden Flusswasser.



Abbildung 6: Ausbildung einer Temperaturfahne (DWA 2016)

Quantitativ wird eine Warmwasserfahne als solche bezeichnet, wenn sie eine mindestens 1 K höhere Temperatur aufweist (Bellack et al. 2008). Abbildung 6 zeigt die Ausbildung einer Temperaturfahne.

Je nach Einleitungsart der Wärme kann sich diese schon zu Beginn unterschiedlich gut durchmischen. Die Einleitung kann als Einzelstrahl-, Freispiegel- oder Diffusoreinleitung stattfinden (siehe Abbildung 7), wobei die Einzelstrahleinleitung üblich ist (DWA 2016). Genauere Erläuterungen der Einleitungsarten finden sich in Anlage 2.

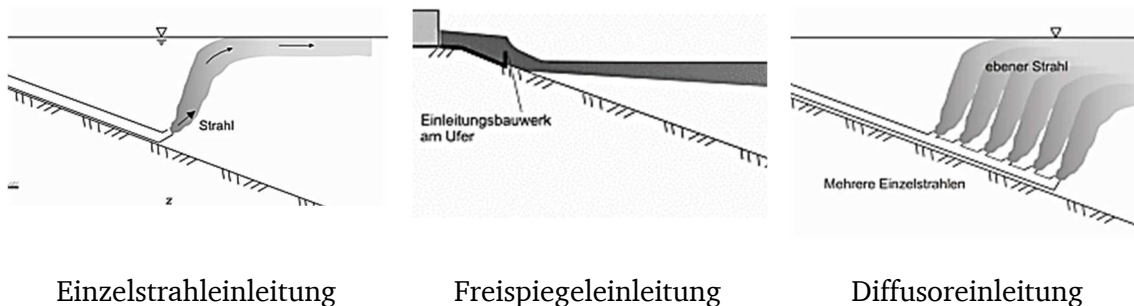


Abbildung 7: Überblick über die Strahleinleitungsmöglichkeiten (DWA 2016)

Unabhängig von der Art der Einleitung wird davon ausgegangen, dass sich die wärmere oder kühlere Temperatur des eingeleiteten Wassers asymptotisch an die Gleichgewichtstemperatur annähert (Bellack et al. 2008).

Prinzipiell kann in einem Fließgewässer, das für Einleitungen genutzt wird, von einer turbulenten Strömung ausgegangen werden (Schwoerbel und Brendelberger 2013). Dieser Umstand hat einen positiven Einfluss auf die Durchmischung, denn abgesehen von den nur im beschränkten Maße vorhandenen Einflüssen der Wärmeleitung des Wassers sowie der Dichteunterschiede der Wassermassen unterschiedlicher Temperatur findet die Durchmischung größtenteils durch den aktiven Transport der Wassermassen aufgrund von Turbulenzen statt. Im Speziellen werden nun drei Ansätze zur Berechnung der Mischungs- und Transportprozesse vorgestellt.

3.5.1 Berechnungsansatz nach der Wärmehaushaltsgleichung

Eine erste mathematische Beschreibung der Durchmischung lässt sich nach (Maniak 2010) aus der Wärmehaushaltsgleichung für Gewässer ableiten. Dabei gilt $P = Q\rho c_p \Delta T$ als Wärmehaushaltsgleichung (vgl. Kapitel 2.3) mit $\Delta T = T(x, t) - T_0(x = 0, t)$. Löst man die Gleichung nach $T_0(x = 0, t)$ auf und setzt $Q = vA$, $P_s = P/V$ und $V = xA$, so folgt als Temperaturverlauf in Abhängigkeit von Ort und Zeit

$$T(x, t) = T_0(x = 0, t) + \frac{1}{c_p \rho} \frac{P_s(x, t)}{v(x, t)} x \quad (10)$$

t: Zeit [s]

x: Ortokoordinate im Längsverlauf [m]

v: Geschwindigkeit des Fließgewässers
[m/s]

V: Volumen [m³]

A: Fließquerschnitt [m²]

P_s: spezifische Leistungsänderung
[kJ/(s m³)]

In dieser abgeleiteten Gleichung ist die Temperatur nur von der x-Koordinate abhängig; das bedeutet, dass keine Unterscheidung im Fließquerschnitt gemacht wird. Es wird eine mittlere Gewässertemperatur über den Querschnitt berechnet.

3.5.2 Berechnungsansatz nach der Stoffkonzentration

Gleiche Mittelung gilt auch für den nächsten Berechnungsansatz nach (Maniak 2010). Da sich Temperatur und Stoffkonzentrationen in Bezug auf die Durchmischung etwa gleich verhalten, kann der nun vorgestellte Ansatz zur Stoffdurchmischung gleichermaßen für die Temperatur verwendet werden.

Die folgende Gleichung richtet sich nach der Massenbilanz aus, in der sowohl Transport- als auch Transformationsprozesse beachtet werden. Sie finden als zeitliche Veränderung der Konzentration ihren Platz in der Gleichung zum Massenerhalt.

$$\frac{\delta C}{\delta x}(A_x dx) = \frac{\delta[A_x D(\delta C/\delta x)]}{\delta x} dx - \frac{\delta(A_x v C)}{\delta x} dx + (A_x dx) \frac{dC}{dt} \pm S \quad (11)$$

C: Konzentration eines Wasserinhaltsstoffes [kg/m³]

D: longitudinaler Dispersionskoeffizient [m²/s]

v: mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt A_x
[m/s]

A_S: Durchflussfläche[m²]

x: Entfernung [m]

t: Zeit [s]

S: Quellen (+), Senken (-)

Unter der Annahme einer über den Fließquerschnitt gemittelten Konzentration, der Erhaltung des Fick'schen Gesetzes (kollektive Diffusion) und der Annahme eines konservativen Stoffes (keine internen Reaktionen / Transformationen) vereinfacht sich die allgemeine Gleichung zu $\frac{\delta C}{\delta t} = D_x \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - v_x \frac{\delta C}{\delta x}$. Geht man von einer plötzlichen Einleitung zum Zeitpunkt t=0 und an der Stelle x=0 aus, so gilt für die Konzentration C:

$$C(x, t) = \frac{1}{2\pi \sqrt{D_x t}} e^{-[(x-vt)^2/4(D_x t)]} \quad (12)$$

3.5.3 Berechnungsansatz mit verschiedenen Mischungsbereichen

Ein dritter Ansatz (nach DWA 2016), um die Durchmischung einer Wärmeeinleitung zu beschreiben und zu berechnen, unterscheidet für die Auswirkungen einer Einleitung mehrere Einflussbereiche, welche in Abbildung 8 zu sehen sind.

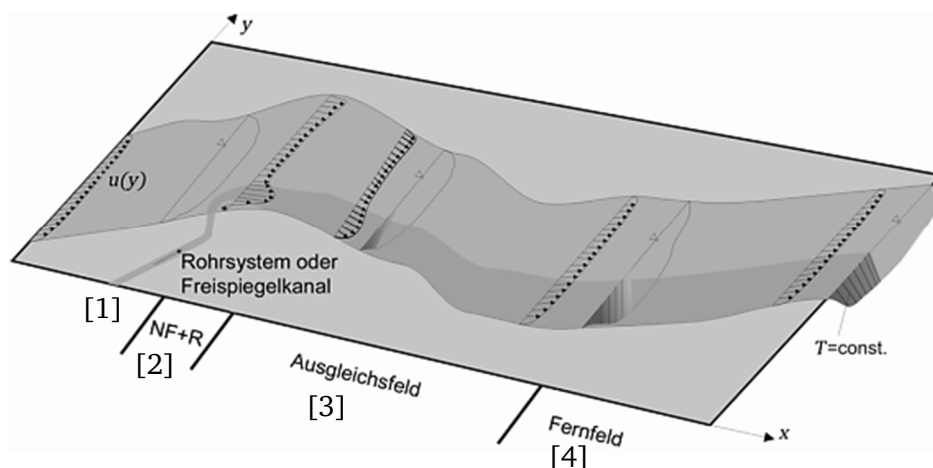


Abbildung 8: Die unterschiedlichen Mischungs- und Transportbereiche (DWA 2016)

Bereich 1 stellt den Freispiegelkanal oder das Rohrsystem dar. Hier findet noch keine Mischung statt. Nahfeld oder auch Anfangsdurchmischungsbereich wird der Bereich 2 genannt; hier dominieren die aktiven, durch die Einleitung induzierten Mischungsprozesse. Dabei hängen der Strahlverlauf des eingeleiteten Wassers wie auch der Durchmischungsgrad von den Einleitungsgrößen wie Impulsfluss oder Geometrien ab. Der

Durchmischungsprozess findet aufgrund des Geschwindigkeitsunterschieds statt, der zu starken Scherungen und dadurch auch zu Turbulenz führt. Sobald der Strahl entweder die Gewässeroberfläche bzw. die Sohle tangiert oder seinen Impuls verliert, tritt der Prozess ein, der im Bereich 3, dem Ausgleichsfeld, stattfindet. Hier haben die Interaktionsprozesse mit der Berandung den größten Einfluss. Der Strahl trifft auf die Berandungen und verliert seine typischen Strahleigenschaften. Die eingeleitete Wassermenge breitet sich an der Berandung aus und bildet aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichte eine Temperaturfahne aus. Die Fahnengeometrie wird dabei vorwiegend von der Berandungsgeometrie beeinflusst. Von nun an befindet sich das Einleitungsfluid im letzten Bereich (Bereich 4), im sogenannten Fernfeld. Dieser Bereich ist ausschließlich durch die passiven, also die natürlichen, Mischungs- und Transportprozesse charakterisiert. Vor allem die natürliche Turbulenz des Gewässers sorgt dafür, dass sich die Wassermengen unterschiedlicher Temperatur – wenn auch nur langsam – vermischen.

Der allgemeine Berechnungsansatz basiert ebenfalls auf der Massen-, aber auch auf der Impulserhaltung (Formeln siehe Anlage 3). Verwendet man diese Formeln für Newton'sches zweites Gesetz $F=ma$, so ergibt sich für die Transportgleichung:

$$\frac{\delta C}{\delta t} + \frac{\delta Cu}{\delta x} + \frac{\delta Cv}{\delta y} + \frac{\delta Cw}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta x} \left(e_x \frac{\delta C}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(e_y \frac{\delta C}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(e_z \frac{\delta C}{\delta z} \right) \pm kC \quad (13)$$

C: Konzentration [kg/m^3]

u, v, w: Komponenten Geschw.-vektor [m/s]

x, y, z: Ortskoordinaten [m]

e_x, e_y, e_z : turbulenter und molekularer

Diffusionskoeffizient [m^2/s]

k: Zerfalls- / Abbaukonstante [$1/\text{s}$]

Nach Newton stehen nun also Terme mit Bezug zur Beschleunigung pro Volumeneinheit auf der linken Seite und Kräfte pro Volumeneinheit auf der rechten Seite. Mithilfe von Annahmen wie Einphasensystem, Fluidinkompressibilität oder Newton'sche Flüssigkeit lässt sich die Gleichung jeweils etwas vereinfachen.

Das Nahfeld wird, wie oben beschrieben, von der Strahldurchmischung dominiert. Die Durchmischung geschieht durch Impulsstrahlen (hohe Austrittsimpulse) oder Auftriebsstrahlen (Bewegung aufgrund von Dichteunterschieden, siehe Anlage 4), üblicherweise aber durch ihre Kombination.

Der Strahlverlauf wird beschrieben durch

$$v\left(b(s_{\text{verlauf}})\right) = \frac{1}{e} v_c(s_{\text{verlauf}}). \quad (14)$$

s_{verlauf} : Strahlverlauf (Mittellinie) [m] v : Geschwindigkeit in Abh. v. der Breite [m/s]
 b : Strahlbreite [m] v_c : Geschwindigkeit an der Mittellinie [m/s]

Gelöst werden kann diese partielle Differenzialgleichung je nach Genauigkeit und Annahmen mit verschiedenen Herangehensweisen. Zum einen gibt es empirische Gleichungen, die aus diesem Ansatz entstanden sind. Eine weitere Methode macht aus der partiellen eine gewöhnliche Differentialgleichung und für alle komplexeren Situationen braucht es numerische Lösungen. Der Ansatz zur Berechnung der Durchmischungslänge ist Anlage 5 zu entnehmen.

4 Einblick Wärmepumpen

Das in der Arbeit untersuchte Konzept ist es, Umweltwärme aus Fließgewässern zum Beheizen von Gebäuden zu nutzen. Da dies nicht ohne technische Hilfsmittel möglich ist, wird im Folgenden das Prinzip des grundlegendsten Hilfsmittels erläutert. Um die Wärme des Fließgewässers überhaupt verwenden zu können, wird sie zunächst durch einen Wärmetauscher aufgenommen; um sie auf ein höheres, zum Heizen oder zur Warmwasserbereitstellung sinnvolles Temperaturniveau zu bringen und schließlich auch nutzbar zu machen, wird eine sogenannte Wärmepumpe benötigt.

Bei konventionellen Heizmethoden wird ein Brennstoff bei sehr hohen Temperaturen verbrannt, um seine Energie freizusetzen und sie zum Heizen nutzen zu können. Letztlich wird jedoch eine wesentlich geringere Vorlauftemperatur für die Wärmenutzungsanlage benötigt, sodass die freigesetzte Energie thermodynamisch gesehen stark entwertet wird. Wärmepumpen als Niedrigtemperatursysteme arbeiten direkt mit geringeren Temperaturen und vermeiden so die starke Entwertung der Energie (Baumann et al.). Bei der Warmwasserbereitstellung zeigt sich ebenfalls der Vorteil einer effizienten Wärmenutzung. Warmwasser aus konventionellen Methoden muss meist in Speichern vorgehalten werden. Da es dort stagniert, muss es auf über 65 °C aufgeheizt werden, um Legionellen und andere Keime abzutöten. Damit das Wasser in angenehmer Temperatur beim Nutzer ankommt, wird schließlich kaltes Wasser zugemischt. Energetisch gesehen ist dies äußerst ineffizient, was bei der Wärmepumpe vermieden werden kann: wird das Wasser im Durchlaufprinzip erwärmt, kann das Warmwasser mit wesentlich geringeren Temperaturen durch die Leitungen fließen (Hartmann und Schwarzbürger 2009).

4.1 Aufbau einer Wärmepumpenheizungsanlage

Die Wärmepumpenheizungsanlage ist der Begriff für alle Bestandteile, die heiztechnisch zwischen dem Umweltmedium und dem beheizten Raum bestehen. Unterteilt wird sie in die Wärmequellenanlage, die eigentliche Wärmepumpe und die Wärmenutzungsanlage, wie es Abbildung 9 zeigt.

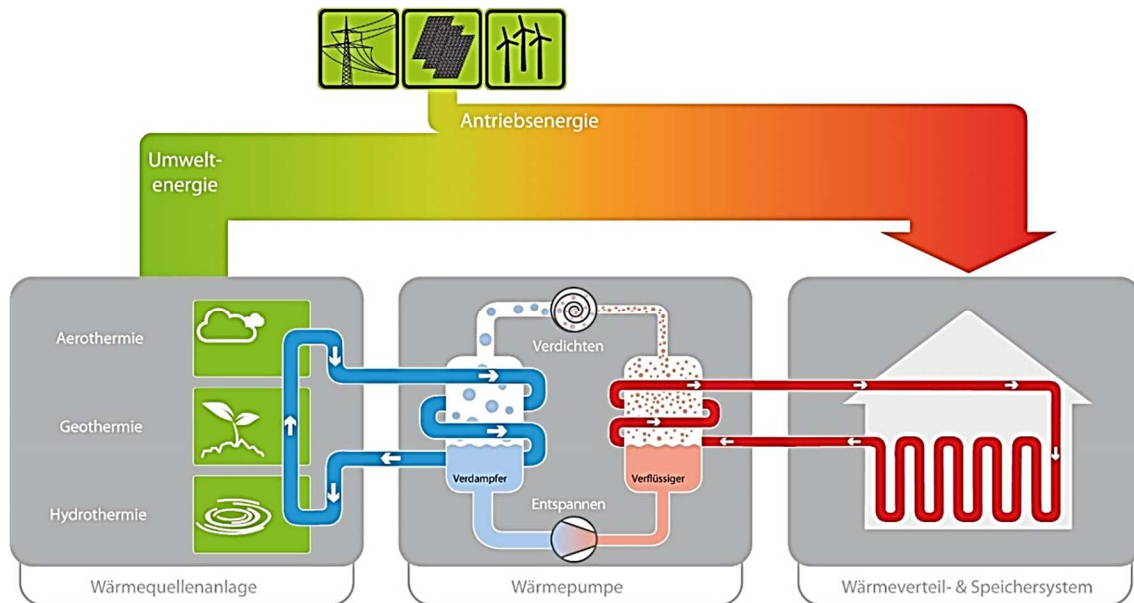


Abbildung 9: Aufbau einer Wärmepumpenheizungsanlage (Sabel)

Die Wärmequellenanlage (WQA) ist der eigentlichen Wärmepumpe vorgeschaltet. Sie entzieht dem Umweltmedium Wärme und transportiert sie mithilfe einer Wärmeträgerflüssigkeit zur Wärmepumpe. Im Fall der Wärmeenergetischen Nutzung bildet der Wärmetauscher zusammen mit den benötigten Rohren und ggf. Pumpen die Quellenanlage. Wärmequellenanlagen, die oberflächennah agieren können, bieten gegenüber den erdgekoppelten Systemen den Vorteil, dass sie im Vergleich nicht so komplex geplant und errichtet werden müssen (Hartmann und Schwarzbürger 2009). Das bedeutet, dass die Errichtung der Wärmequellenanlage für die Nutzung der Fließgewässerwärme einfacher und damit auch kostengünstiger als für eine Geothermie-Nutzung ist.

Die Wärmepumpe, die die Hauptfunktion der Wärmepumpenheizungsanlage erfüllt, bringt die Wärme aus dem Umweltmedium von einem niedrigen auf das zur Beheizung notwendige Temperaturniveau. Dieser Prozess wird im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert.

In der Wärmenutzungsanlage – auch Wärmeverteils- und Speichersystem genannt – wird die Wärme aus der Wärmepumpe zum Verbraucher transportiert, wo sie schließlich der Raumbeheizung oder Warmwasserbereitstellung dient. Das System, mit dem die Wärme an den Raum oder das Wasser abgegeben wird, gehört auch zur Wärmenutzungsanlage. Dabei kann das System ein Heizungswasserspeicher, Wand- oder Fußbodenheizsystem für die Wärmeübertragung an den Raum sein, aber auch beispielsweise eine externe Frischwasserstation für die Wärmeübertragung an das künftige Warmwasser.

Voraussetzung für das dauerhafte Funktionieren einer Wärmepumpenheizungsanlage ist die Fähigkeit des Umweltmediums, sich ständig zu regenerieren (Hartmann und Schwarzbürger 2009). Die andauernde Wärmeabgabe oder -entnahme durch den Wärmetauscher würde sonst auf lange Sicht zu einer extremen Auskühlung oder Erhitzung des Mediums führen.

4.2 Prinzip der Wärmepumpe

Wärmepumpen sind folglich in der Lage, das thermische Potenzial aus der Umwelt tatsächlich nutzbar zu machen. Die prinzipielle Funktionsweise einer Wärmepumpe ist das Bereitstellen von Heizenergie, indem der Großteil der Energie durch Umweltenergie und ein unterstützender Anteil elektrischer Energie verwendet werden.

Das Prinzip wird in Abbildung 10 verdeutlicht. Hier sind die verschiedenen Schritte vom Entzug der Umweltwärme hin zur Bereitstellung von Heizwärme dargestellt. Dabei beschreibt Schritt 1 den Vorgang, die Umweltwärme mittels Wärmetauscher auf eine Wärmeträgerflüssigkeit zu übertragen (Primärkreislauf). Als Wärmeträgerflüssigkeit wird meist Sole verwendet. Nun kommt die eigentliche Wärmepumpe zum Einsatz: Im nächsten Schritt wird die Wärmeträgerflüssigkeit am Verdampfer vorbeigeleitet. Die Wärmeenergie, die in der Wärmeträgerflüssigkeit vorhanden ist, wird im Verdampfer auf das sogenannte Kältemittel übertragen, welches aufgrund seiner niedrigen Siedetemperatur schließlich verdampft. Im Verdichter (Schritt 3) wird der Kältemittel-Dampf komprimiert, um dessen Temperatur zu erhöhen. Im darauffolgenden Schritt kondensiert das Kältemittel im Verflüssiger wieder. Durch das Verflüssigen wird Wärme freigesetzt, die auf das Heizwasser übertragen wird. Hier wird das Prinzip der Kondensationsenthalpie genutzt, welches in Kapitel 3.3 erläutert ist. Das erwärmte Heizwasser wird im 5. Schritt – nun außerhalb der eigentlichen Wärmepumpe - im Heizungskreislauf (Sekundärkreislauf) zur Gebäudebeheizung genutzt. Sobald das Heizwasser Wärme im Gebäude abgegeben hat, wird es wieder zurück zum Verflüssiger geführt, um neue Wärme aufzunehmen. Der letzte Schritt vervollständigt den Kreislauf, da auch das Kältemittel vom Verflüssiger zurück zum Verdampfer geleitet wird, um neue Wärmemenge von der Wärmeträgerflüssigkeit aufzunehmen. Auf dem Weg dorthin wird der Druck des Kältemittels wieder gesenkt und seine Temperatur fällt.

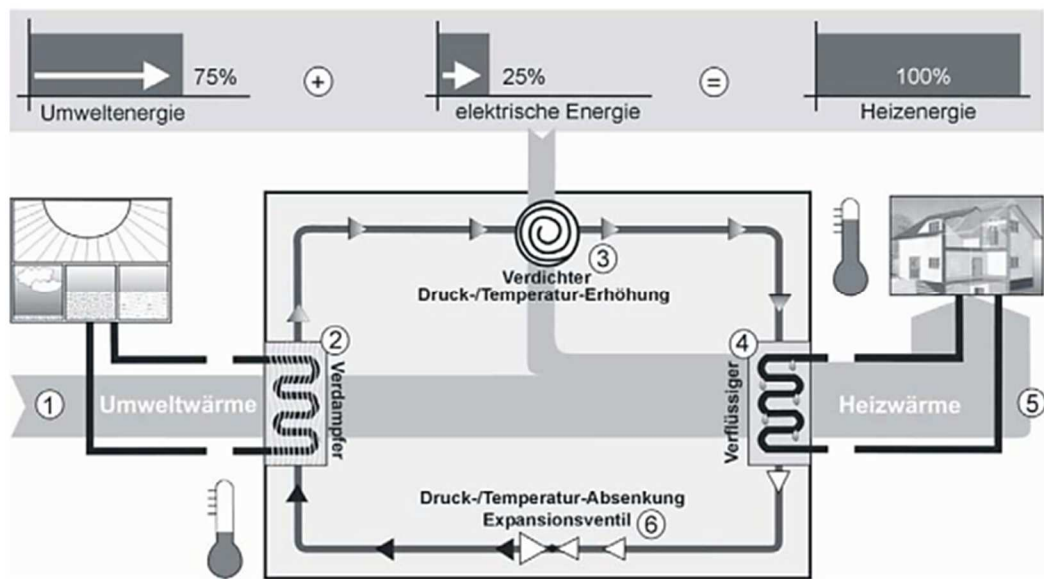


Abbildung 10: Prinzip einer Wärmepumpenanlage (Tholen und Walker-Hertkorn 2008)

Im Speziellen wird nochmals der sogenannte *Kältekreis* betrachtet: Die soeben beschriebenen Phasen, in denen das Kältemittel, verdampft, verdichtet, verflüssigt und entspannt wird, laufen im Kältekreis ab, der der Wärmepumpe entspricht. Im Kältekreis wird zusätzliche Energie benötigt, damit das Kältemittel die verschiedenen Phasen durchlaufen kann und das Temperaturniveau bis zur Übertragung der Wärme auf das Heizwasser ansteigt. Gerade im 3. Schritt wird Energie - mechanische Arbeit, meist in Form eines elektrisch getriebenen Kompressors – aufgewendet, um den Druck und damit die Temperatur des Kältemittels zu erhöhen (Hartmann und Schwarzburger 2009).

Dafür, wie die Wärme in den Kältekreis gelangt, gibt es bei der wärmeenergetischen Nutzung von Fließgewässern zwei Möglichkeiten: das offene System ohne Zwischenkreislauf und das geschlossene System mit Zwischenkreislauf (siehe Abbildung 11).

Beim *offenen System* wird aus dem Fließgewässer Wasser entnommen, zur Wärmepumpe gefördert und nach dem Wärmeentzug wieder zurückgeleitet. Beachtet werden muss, dass hier eine Benutzung im Sinne § 9 WHG stattfindet und entsprechend strenge Auflagen beim Entnehmen und Wiedereinleiten des Wassers gelten. Beispielsweise muss das Wasser vor dem Wiedereinleiten vorgereinigt werden, d.h. dass Material aus Sedimentation und Siebung, soweit dies möglich ist, beseitigt werden muss. Im Gegensatz dazu wird beim *geschlossenen System* die Wärme direkt im Gewässer über einen Wärmetauscher übertragen, der ebenfalls im Gewässer installiert ist. Hier ist anzumerken, dass die Ausbau- und Unterhaltungsarbeiten an den Rohrsystemen durch das Arbeiten im

Gewässer erschwert werden. Außerdem kann die Wärmeübertragung am Wärmetauscher durch Verschmutzung und Bewuchs beeinträchtigt werden. Je langsamer dabei das Gewässer fließt, desto größer werden die Bewuchsprobleme. Großen Einfluss auf den Bewuchs hat außerdem der Umstand, wie groß die Menge an organischen Substanzen im Fließgewässer ist. Fließgewässer sind etwa ab der Güteklasse II/III als kritisch hierfür anzusehen (Glatzel und Heise 1980). Bei beiden Systemvarianten ist darauf zu achten, dass die Möglichkeit von Leckagen, die mit Austritt von Arbeitsmitteln verbunden sind, unterbunden werden muss, beispielsweise durch die Wahl nichtkorrosiver Werkstoffe. Außerdem ist der Einsatz der Wärmepumpe unterhalb einer Wassertemperatur von 4 °C nicht mehr zu empfehlen, da die Gefahr von Vereisungen innerhalb der Wärmepumpenanlage besteht (Glatzel und Heise 1980)

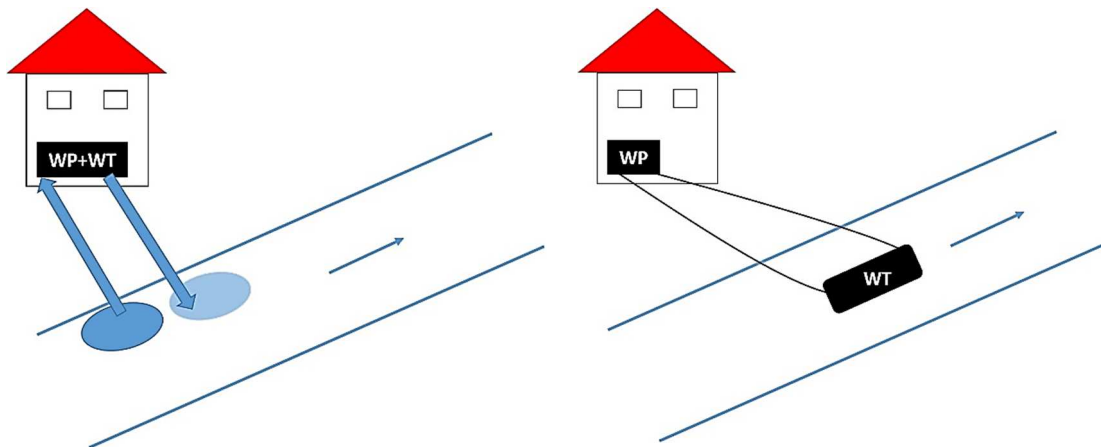


Abbildung 11: Darstellung des offenen (l.) und geschlossenen Systems (r.)

4.3 Kühlen von Gebäuden

Wärmepumpen können nicht nur zum Beheizen von Räumen oder Wasser genutzt werden, sondern auch in der Kühlung von Gebäuden Verwendung finden. Gerade im Hochsommer kann eine Gebäudekühlung sinnvoll sein.

Es kann prinzipiell zwischen der aktiven und der passiven Kühlung unterschieden werden. Bei der passiven Kühlung bleibt die Wärmepumpe respektive der Kompressor der Wärmepumpe ausgeschaltet. Die Wärme des Gebäudes wird über die Wärmenutzungsanlage und -quellenanlage in das kühlere Fließgewässer geleitet. Bei der aktiven Kühlung wird das Prinzip der Wärmepumpe umgekehrt, d.h. die Richtung im Kältekreis ändert sich; nun ähnelt das System dem eines Kältschranks. Damit eine Wärmepumpe

in beide Richtungen laufen kann, wird ihr bisheriges Anlagensystem um einen Plattenwärmetauscher und Umschaltventile ergänzt (Hartmann und Schwarzbürger 2009).

Die aktive Kühlung ist im Wohnungsbau meist nicht notwendig, stattdessen kann hier die passive Kühlung als stromsparende Alternative eingesetzt werden. Besonders geeignet, um effektiv Wärme aus den Räumen der Gebäude abzuleiten, sind Heizungsanlagen mit großen Wärmeübertragungsflächen, wie beispielsweise die Fußbodenheizung (Hartmann und Schwarzbürger 2009).

Zur Kühlung mittels Wärmepumpe gibt es verschiedene Kühlverfahren. Es wird zwischen der Durchlauf-, Ablauf- und Kreislaufkühlung unterschieden. Während bei der Ablauf- und Kreislaufkühlung Kühltürme zum Einsatz kommen, welche erst bei der Kühlung von z.B. Kraftwerken notwendig werden, wird für das Kühlen von Wohngebäuden die Durchlaufkühlung eingesetzt. Das bedeutet, dass Frischwasser dem Umweltmedium entnommen, genutzt (Übertragen der Wärme auf das Wasser) und anschließend wieder zurückgeleitet wird.

4.4 Daten eines potenziellen Wärmetauschers

Die Ausführung von Wärmetauschern kann sehr unterschiedlich sein, wodurch auch ganz verschiedene Anforderungen eingehalten werden müssen. Geplant ist hier ein modularer Wärmetauscher, der auf den Einsatz in Fließgewässern ausgelegt ist. Er wird voraussichtlich geeignet sein für Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 3,0 m/s, für Fließtiefen ab 0,8 m (aufgrund des 0,6 m großen Durchmessers des Wärmetauschers) und Wassertemperaturen zwischen 4 und 30 °C (Borchardt 2017).

Angestrebt wird ein geschlossenes System, in dem der Wärmetauscher in die Wasserentnahmestelle eingesetzt wird, um eine Benutzung des Wassers nach § 9 WHG zu vermeiden und die Effizienz der Anlage zu steigern. Dabei soll der Wärmetauscher möglichst so entwickelt werden, dass er einen Selbstreinigungsmechanismus aufweist, sowohl die Strömungsenergie als auch die Wärme optimal überträgt, die Fouling- und Verklausungsgefahr minimiert und fischverträglich ist (Borchardt 2017). Dabei beschreibt Verklausung den Wasserstandanstieg aufgrund von Treibgutansammlungen und Fouling bezeichnet die Verschmutzung bzw. Belagbildung auf verfahrenstechnischen Anlagen, wie beispielsweise Wärmeüberträgern.

5 Auswirkungen von Temperaturänderungen auf das Flusssystem

Fließgewässer bieten Lebensraum für Lebensgemeinschaften, die sich auf die vorhandenen Lebensbedingungen eingestellt haben. Dabei sind diese Bedingungen geprägt durch geologische, chemische, biologische und physikalische Faktoren; wichtige Einflüsse sind die Fließgeschwindigkeit, der Gashaushalt und vor allem die Temperatur. Ändert sich die Temperatur langfristig, kann sich der Lebensraum des Fließgewässers verändern, was mit Risiken für die Lebensgemeinschaften verbunden ist. Dabei treten unterschiedliche Folgen – abhängig davon, ob die Temperatur ansteigt oder sinkt. Hier ist nicht nur die Durchschnitts- oder Maximal- bzw. Minimaltemperatur entscheidend, auch andere Eigenschaften des Temperaturgeschehens, wie beispielsweise die Temperaturdifferenz (Aufwärm- bzw. Abkühlspanne), haben Einfluss auf den Lebensraum Fließgewässer. Beachtet man bei Warm- oder Kaltwassereinleitungen auch, dass sich die unterschiedlich warmen Wasserbereiche nicht direkt mischen, kann es zu sogenannten Temperaturfahnen (vgl. Kapitel 3.5) kommen, die sich ökologisch gesehen auch nachteilig auswirken können.

Außerdem sind auch bei Wärmeeinleitungen in Verbindung mit vorheriger Kühlwasserentnahme nachteilige Auswirkungen zu berücksichtigen. Beispielsweise wird die Strömung verringert, die Tendenz zu Schlammablagerungen steigt und die ökologische Durchgängigkeit (Durchwanderbarkeit für Fische) kann beeinträchtigt werden. In vorliegender Arbeit kann dieser Fall jedoch vernachlässigt werden, da ein Wärmeentzug innerhalb des Gewässers vorliegt.

5.1 Temperaturerhöhungen

Im Folgenden werden die direkten Auswirkungen der Temperaturerhöhung in Bezug auf den biologischen und den chemischen Zustand des Fließgewässers beschrieben. Anschließend werden sonstige direkte Auswirkungen angesprochen und auch indirekte Auswirkungen aufgrund der Änderung des Sauerstoffgehalts dargestellt.

Temperaturfahnen bzw. Wärmefahnen im Speziellen können wie eine Barriere für die Fischfauna wirken und behindern oftmals die Wege der Fische (Bellack et al. 2008).

Grundsätzlich werden im Nachfolgenden allerdings die Auswirkungen von Temperaturerhöhungen nach Einstellung der Mischungstemperatur beschrieben.

5.1.1 Direkte biologische Auswirkungen

Der biologische Zustand ist stark abhängig von der Gewässertemperatur. Prinzipiell können die biologischen Folgen einer Temperaturerhöhung differenziert werden in Auswirkungen auf Fische, Makroorganismen und Mikroorganismen.

Fische sind wechselwarme Lebewesen und damit von der Temperatur ihrer Umgebung abhängig. Die Temperatur beeinflusst dabei alle physiologischen Vorgänge im Fisch wie die Aktivität, Nahrungsaufnahme, Wachstum oder Vermehrung. Sie besitzen einen artspezifischen Temperaturbereich, der je nach Alter schwanken kann, in dem sie leben können. Grundsätzlich wird zwischen Kaltwasserfischarten (oglio-stenotherm) und wärmetoleranten Fischarten (mesoeruytherm) unterschieden. Die Temperaturbereiche des Karpfens (wärmetolerant) sind in Abbildung 12 dargestellt.

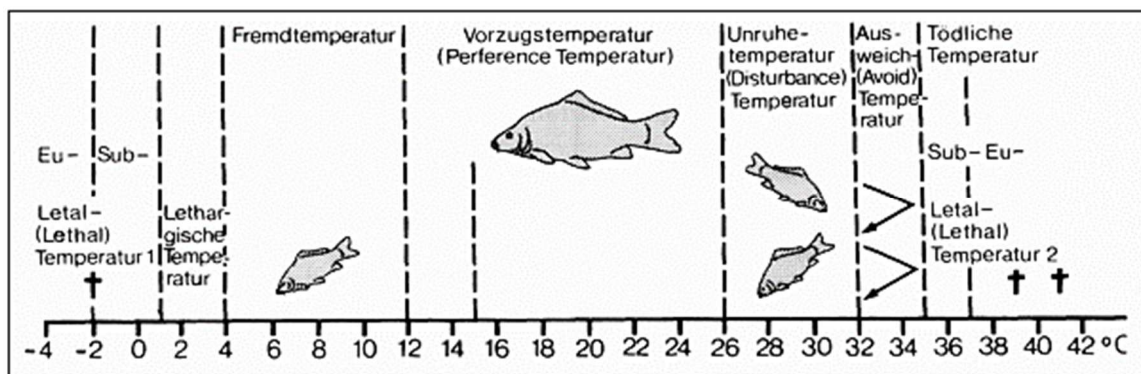


Abbildung 12: Temperaturbereiche des Karpfens (wärmetolerant) (Bellack et al. 2008)

Die Bedeutung der verschiedenen Temperaturbegriffe ist Anlage 6 zu entnehmen. Steigt die Temperatur des Gewässers beispielsweise über 26 °C, so tritt der Unruhebereich des Fisches ein, in dem er seine Nahrungsaufnahme reduziert oder einstellt. Eine Forelle wird bei diesen Temperaturen schon letal (Bellack et al. 2008). Um eine direkte Schädigung der Fische zu minimieren, müssen also die artspezifischen Temperaturbereiche eingehalten werden. Außerdem besteht das Risiko des Fischsterbens, indem sich die Temperatur zu schnell erhöht und die Fische einen Temperaturschock erleiden.

Weiterhin ist darauf zu achten, dass für viele Fischarten eine Winterruhe nötig ist, um die Laichzeit zu steuern oder mit vermindertem Nahrungsangebot auszukommen. Wird die Winterruhe aufgrund von höheren Temperaturen unterbunden, kann das Laichen im

schlimmsten Fall ausbleiben und Fische können aufgrund von höherem Stoffumsatz, aber geringem Nahrungsangebot verhungern (Bellack et al. 2008).

Außerdem besteht das Risiko, durch Temperaturerhöhung natürliche Fischfeinde oder Parasiten anzulocken, die in wärmeren Gefilden überwintern wollen, und Infektionskrankheiten zu begünstigen. Die Verschiebung im Artenspektrum kann für den Lebensraum und den Menschen sehr nachteilig sein.

Einen Überblick über die Folgen gibt Tabelle 3:

Tabelle 3: Überblick über mögliche Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf Fische (Bellack et al. 2008)

Direkte Auswirkungen	Damit einhergehende Auswirkungen
<ul style="list-style-type: none"> - Fischsterben durch Hitze - Fischsterben durch Temperaturschock - Reversible oder irreversible Schädigung von Organen oder physiologischen Leistungen (z.B. Nervenfunktion, Atmung) - Störung der Reifung der Geschlechtsprodukte - Verschiebung der Laichperioden - Einstellung der Nahrungsaufnahme - Vermeidungsverhalten, Abwanderung 	<ul style="list-style-type: none"> - Veränderung der Artenspektren, Veränderung von Biozönosen - Verlust von Arten - Förderung von habitalfremden, unerwünschten Arten - Verstärkte Virulenz von Parasiten und Krankheiten

Makroorganismen können wie folgt beeinträchtigt werden: Die Biozönose des Makrozoobenthos – der Gemeinschaft an Lebewesen, die am Gewässerboden leben und mit dem Auge noch erkennbar sind - beispielsweise verändert sich bei Temperaturerhöhungen dahingehend, dass sich thermotolerantere Arten ansiedeln und vermehren. Einige dieser Arten neigen zu Massenentwicklungen, sodass sie durch ihre große Bevölkerung die ursprüngliche Fauna verdrängen (Bellack et al. 2008). Einigen Fließgewässerinsekten (z.B. Stein- und Köcherfliegen) werden durch zu warme Temperaturen im Winter dahingehend geschadet, dass Ei- und Larvenstadien gestört werden. Durch die fehlenden Ruhephasen im Winter kann es zu vorzeitiger Ei- und Larvenreifung kommen. Nachgewiesen ist auch allgemein die steigende Mortalität von einigen Fließgewässerinsekten bei Wassertemperaturen von über 25 °C (Bellack et al. 2008). Durch die Veränderung der Biozönose ist eine Verschlechterung des ökologischen Zustands wahrscheinlich.

Unter Mikroorganismen sind unter anderem Bakterien, Pilze, Viren und einzellige planktische Algen zu verstehen. Sie spielen in Gewässern eine wichtige Rolle beim Abbau organischer Substanzen, in den Stoffkreisläufen und dem Nahrungsnetz des Ökosystems. Mikroorganismen unterliegen den physikalischen und chemischen Bedingungen der Gewässer. Temperaturschwankungen bedingen beispielsweise immer Veränderungen in der Artenzusammensetzung von Bakteriengemeinschaften, um sich auf die Temperaturen einzustellen. Ob dies nachteilige Folgen haben kann, ist allerdings unklar. Das Wachstum von Phytoplankton wird ebenfalls durch die Temperatur gesteuert: Phytoplanktonarten wie Phytoflagellaten und Kieselalgen sind kaltwasserliebend, sie sind während des Winters an die Eisbedeckung angepasst und werden bei Erwärmung von den schnell wachsenden Frühjahrsarten der Mikroorganismen unterdrückt (Bellack et al. 2008).

5.1.2 Direkte chemische Auswirkungen

Chemische Prozesse werden oftmals von der Temperatur stark beeinflusst, weswegen auch der chemische Zustand im Gewässer von ihr abhängig ist. Sie entscheidet beispielsweise darüber, auf welcher Seite einer Reaktion das Gleichgewicht liegt. Beschrieben werden im Folgenden jene Reaktionen, die im Gewässer relevant und abhängig von der Temperatur sind.

Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht wird durch eine Temperaturerhöhung dahingehend beeinflusst, dass die Löslichkeit des Kohlenstoffdioxids sinkt und Calciumcarbonat ausfallen kann. Kohlenstoffdioxid selbst wird bei Erwärmung an der einen Stelle der Reaktion vermehrt produziert, an einer anderen stärker verbraucht. Beide Vorgänge sind im Rahmen der Wärmeenergetischen Nutzung unbedeutend (Bellack et al. 2008). Ähnlich verhält es sich mit Lösungsvorgängen und Korrosion allgemein. Bei höheren Temperaturen können Stoffe schneller gelöst werden, in der Größenordnung der Wärmeenergetischen Nutzung allerdings kaum merklich (Bellack et al. 2008). Die Korrosion hängt nicht stark von der Temperatur ab und zeigt bei den Temperaturerhöhungen bei Wärmeeinleitungen kaum eine Erhöhung.

Signifikant sind allerdings Veränderungen im Stickstoffhaushalt sowie bei der Bildung und dem Abbau organischer Stoffe. Steigt die Temperatur, so verschiebt sich im Stickstoffhaushalt das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht insoweit, dass Ammoniak freigesetzt werden kann. Dies führt oftmals zur Belastung des Sauerstoffhaushalts und Fischschädigungen (Bellack et al. 2008). Organische Stoffe werden bei höheren Tempe-

raturen vermehrt gebildet, ihr Abbau verbraucht Sauerstoff. Werden mehr organische Stoffe gebildet, so muss mehr Sauerstoff zum Abbau verbraucht werden, was den Sauerstoffhaushalt gleichfalls stark belastet.

5.1.3 Sonstige direkte Auswirkungen

Neben den Auswirkungen, die innerhalb des Gewässers auftreten, können Temperaturen auch auf andere Wassernutzungen Einfluss nehmen.

Ein möglicherweise relevantes Thema ist, inwieweit die Trinkwassergewinnung beeinflusst wird. Hier wurde durch zahlreiche Beobachtungen und Modellversuche festgestellt, dass mit keinen nachteiligen Auswirkungen von Wärmeeinleitungen zu rechnen ist (Bellack et al. 2008). Auch bei der landwirtschaftlichen Bewässerung gilt, dass eine Bewässerung mit erwärmtem Flusswasser keine landwirtschaftlichen Nachteile auftreten, sondern eher positiv sein kann (Bellack et al. 2008).

Nachteilig von Wärmeeinleitungen betroffen ist die Fischerei, da das Fischen eine zusätzliche Dezimierung der ohnehin schon belasteten Fische darstellt. Die Schifffahrt kann – neben einer gegebenenfalls ungeeigneten Gestaltung der eingesetzten Anlagen – selten durch auftretendes „Flussrauchen“ oder Nebelbildung beeinträchtigt werden (Bellack et al. 2008). Die sogenannte Nebelbildung tritt auf bei Unterschreitung des Taupunkts in Verbindung mit dem Vorhandensein von Kristallisationskeimen. Wenn sich das Fließgewässer erwärmt, verdunstet vermehrt Wasser, das als Wasserdampf in die Umgebungsluft geht. Beträgt der Temperaturunterschied zwischen Wasser und Luft mehr als 5 K, kondensiert das Wasser in der Luft über dem Fließgewässer wieder und bildet einen Nebel, der die Sicht für Schiffe behindern kann (Bellack et al. 2008). Gewisse meteorologische Umstände können diese Situation verschärfen.

5.1.4 Indirekte Auswirkungen durch Veränderung des Sauerstoffgehalts

Die Temperatur kann nicht nur direkt die Bedingungen im Fließgewässer verändern. Indirekt treten außerdem Veränderungen auf, indem der Sauerstoffgehalt durch eine Wassererwärmung negativ beeinflusst wird.

Der Sauerstoff ist im Wasser gelöst. Wie viel Gas im Wasser gelöst ist, ist sowohl aus physikalischer Sicht als auch aus biologischer Sicht von der Temperatur abhängig.

Physikalisch gesehen sinkt der Sauerstoffgehalt mit zunehmender Temperatur, da bei Temperaturanstieg seine Löslichkeit abfällt. Beträgt der Sättigungswert beispielsweise beim Gefrierpunkt noch 14,6 mg/l, beläuft sich der Wert bei 20 °C lediglich auf

9,1 mg/l. Allgemein gelangt Sauerstoff in ein Fließgewässer durch den Gasaustausch zwischen wasseroberflächennaher Luft und Flusswasser. Durch Wärmeeinleitungen entstehende Wärmefahnen können den atmosphärischen Austausch jedoch verhindern (Bellack et al. 2008).

Aus biologischer Sicht betrachtet, sinkt der Sauerstoffgehalt aufgrund von enzymatisch bedingten, sauerstoffverbrauchenden Stoffumwandlungen. Durch die Vielfalt an Flusshabitaten in der fließenden Welle, der Sohle und in Flachwasserbereichen ergibt sich ein komplexer Sauerstoffhaushalt. Bekannt ist allerdings, dass der Sauerstoffgehalt gerade in den Unterläufen von großen Flüssen schwankt und abnimmt, da hier aufgrund geringerer Turbulenz vermehrt Plankton auftritt (Bellack et al. 2008). Planktonarten wie Phytoplankton oder Zooplankton verbrauchen - hier wie auch in Stauhaltungen - durch ihre hohen Umsatzraten viel Sauerstoff. Wird die Temperatur erhöht, wird der Abbau organischer Substanzen (Umsatzrate) beschleunigt und der Sauerstoffverbrauch nimmt zu. Der Einfluss der Aufwärmung auf den mikrobiellen Sauerstoffbedarf kann mithilfe von Simulationsmodellen und Gleichungen abgeschätzt werden. Eine Abschätzung des erhöhten Sauerstoffverbrauchs nach (Bellack et al. 2008) liefert mit $k = 0,1 \times 1,047^{T-20}$ die Gleichung

$$y_L = L_{oN} \times (1 - 10^{-kt}). \quad (15)$$

y_L : Sauerstoffbedarf in der Zeit t [mg/l]

t : Zeit [Tage]

L_{oN} : voller Sauerstoffbedarf o. Nitrifikation [mg/l]

T : Temperatur [°C]

Bei höheren Temperaturen enthält das Wasser also weniger Sauerstoff, wobei Fische und diverse andere Organismen im Wasser gerade dann mehr Sauerstoff benötigen. Häufig kann es daher zu Fischsterben kommen. Auch das Absterben von Eiern und Larven wird durch einen geringen Sauerstoffgehalt begünstigt.

5.2 Temperaturabsenkungen

Verallgemeinerte Aussagen darüber, welche Auswirkungen Temperaturerniedrigungen mit sich führen, liegen kaum vor. Es kann mit einigen Beispielen und Abschätzungen argumentiert werden.

Der Murray-Fluss des australischen Südostens erfährt Temperaturabkühlungen dadurch, dass kaltes Tiefenwasser aus dem Humesee an den Fluss abgegeben wird. Hier wurde

ein Rückgang einiger einheimischer Fischarten, wie z.B. des Goldbarschs oder Zwergwels, festgestellt (Glatzel und Heise 1980). Der Goldbarsch benötigt zum Laichen Temperaturen über 23 °C. Werden diese nicht oder nicht zum richtigen Zeitpunkt erreicht, können Laichperioden ausfallen. Wie oft zu beobachten, traten auch hier andere Arten an den Platz derjenigen mit reduzierter Artenpopulation: fremde, ausgesetzte Arten - der Flussbarsch, die Forelle und der Karpfen - konnten sich verbreiten und vermehren (Glatzel und Heise 1980).

In der Lenne, einem nordrhein-westfälischen Mittelgebirgsfluss, waren Phänomene dadurch bedingt zu beobachten, dass eine Gewässererwärmung plötzlich eingestellt wurde und das Flusswasser dadurch – ebenfalls plötzlich - relativ gesehen kühler geworden ist (Glatzel und Heise 1980). Vor allem die Bodenfauna reagierte darauf, indem sich einige Arten vom Untergrund lösten und verdriften ließen. Zudem ging die Population eines bislang dominierenden Wasserinsektes zurück und wurde durch eine Egelart ersetzt (Glatzel und Heise 1980). Meist gilt, dass schnelle Temperatursenkungen für den Lebensraum im Fließgewässer schädlicher sind als rasche Temperaturerhöhungen (Bellack et al. 2008).

Allgemeine Aussagen können dazu getroffen werden, dass organische Belastungen im abgekühlten Gewässer länger andauern als im vergleichsweise wärmeren Gewässer (Glatzel und Heise 1980). Außerdem verlangsamten sich stoffwechseldynamische Prozesse. Die Prozesse werden doppelt bis dreifach so langsam je Temperaturerniedrigung um 10 K (Glatzel und Heise 1980). Dadurch dauert sowohl die Mineralisation von organischen oxidierbaren Wasserinhaltsstoffen als auch der mikrobielle Abbau organischer Substanzen länger. Durch das Zusammenspiel von geringerer Temperatur und der Verlangsamung des mikrobiellen Abbaus organischer Stoffe wird der Sauerstoffhaushalt weniger stark belastet. In Bezug auf die Gewässerreinigung ist ebenfalls vorteilhaft, dass durch den Wärmeentzug die Planktonentwicklung zurückgeht.

Wenn beachtet wird, dass durch die Wärmepumpe keine toxischen Beeinträchtigungen erfolgen und eine maximale Abkühlspanne von 3 bis 5 K eingehalten wird, um eine plötzliche und starke Abkühlung zu verhindern, wird der Einsatz von Wärmepumpen für den Wärmeentzug oftmals als positiv bewertet (Glatzel und Heise 1980). Vor allem im Hinblick auf die Verbesserung des Sauerstoffhaushalts und die Rückführung der Gewässertemperatur auf naturursprünglichere Verhältnisse. Da sich die Gewässertemperaturen durch anthropogene Einflüsse erhöht haben, ist oftmals davon die Sprache, dass

eine Gewässerabkühlung durch Wärmepumpe als Schadensminimierung anstelle einer Schädigung der Natur angesehen werden kann (Glatzel und Heise 1980).

Festgehalten werden sollte, dass einige der Einschätzungen ca. 30 Jahre zurückliegen, in denen noch nicht von jenen erhöhten Temperaturen ausgegangen werden konnte, die mittlerweile in vielen Fließgewässern vorliegen. Trotzdem kamen die Fachreferenten schon zu dem Entschluss, eine Abkühlung der Fließgewässer könne vorteilhaft sein. Um dies mit einem aktuellen Beispiel zu bekräftigen: Über den Einsatz einer Wärmepumpe in der Wetter ist die Untere Wasserbehörde Wetteraukreis „dankbar“, da das Gewässer oberhalb der Görbelheimer Mühle, wo die Wärmepumpe installiert ist, durch zwei Zuflüsse von Kläranlagen stark erwärmt wird. Zu beobachten waren die Verbreitung von Fischfeinden und der Rückgang von Fischarten, was nun entschärft wurde (Thomas Buch 2017).

6 Die ausgewählten Fließgewässer - Sachlage

In vorliegender Arbeit soll der mögliche Einsatz einer Wärmepumpe in den Fließgewässern Nidda, Wetter und Kinzig untersucht werden. Die drei Fließgewässer (siehe Abbildung 13) entstehen am Vogelsberg und fließen durch Hessen. Während die Wetter in die Nidda mündet, münden sowohl Nidda als auch Kinzig in den Main. Nach einer kurzen Vorstellung der Flüsse folgen die ermittelten Daten, die für die Analyse der Flussläufe in Bezug auf geeignete Wärmetauscher-Standorte relevant sein können. Dabei werden die Schutzgebiete aufgelistet, in denen wasserabhängige Lebewesen angesiedelt sind und in denen damit die Fließgewässer eine Rolle spielen (Vogelschutzgebiete und Flora-Fauna-Habitat-Gebiete (FFH-Gebiete)). Die Fließgewässer werden abschnittsweise den verschiedenen Fischregionen zuordnet, von denen gesetzliche Regelungen abhängig sind (vgl. Kapitel 7.2). Ihre Gewässergüte wird bestimmt, da weitere Eingriffe in die Natur auch von der bisherigen Belastung der Fließgewässer abhängen. Die Gewässergüte wird in Anlage 7 erläutert. Im Anhang (siehe Anlage 8) sind schließlich die Kläranlagen angesprochen, die durch Wassereinleitungen in die Flussabschnitte Temperaturerhöhungen bedingen können, und auch Mühlgräben aufgeführt, die potenziell geeignete Standorte darstellen (vgl. Kapitel 9).

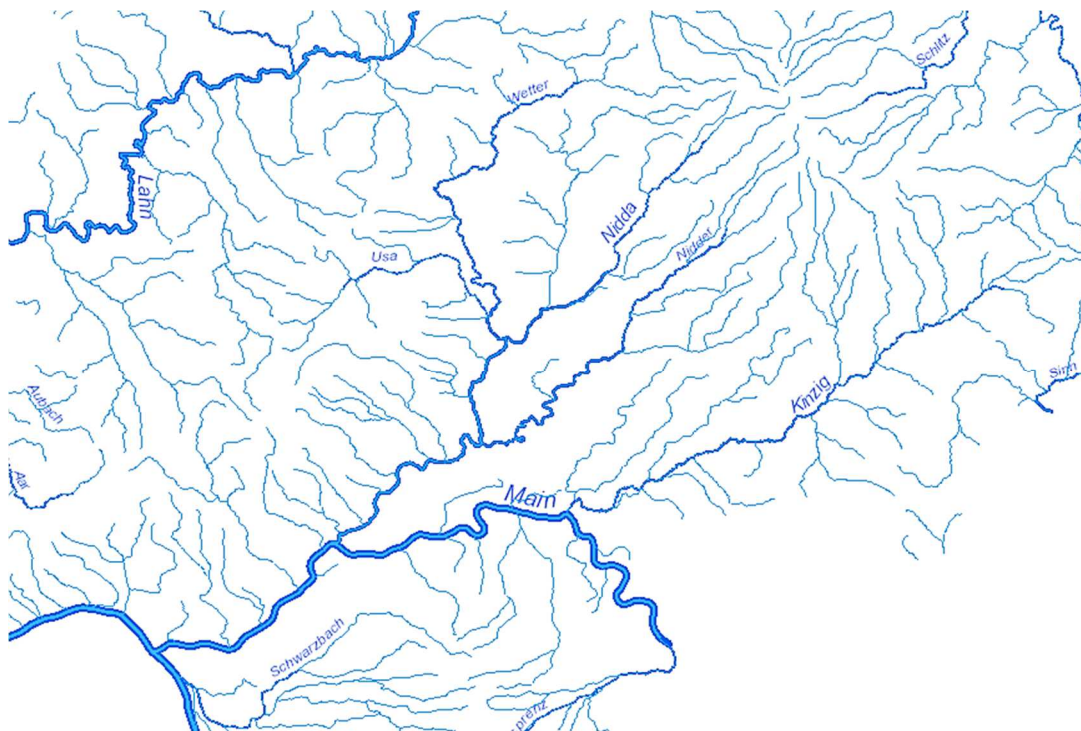


Abbildung 13: Überblick über die Lage der Fließgewässer Nidda, Wetter, Kinzig (Weinberger)

Flussbegradigungen der Vergangenheit. Bis in die 1960er wurde die Nidda an einigen Stellen – beispielsweise in Bonames und Bad Vilbel - begradigt in dem Glauben, so Hochwässer zu vermeiden oder zu verringern (Krohn et al. 2008). Mittlerweile wird wieder eine Renaturierung der Nidda angestrebt.

Folgende Daten können für die Wahl der geeigneten Standorte des Wärmetauschers von Bedeutung sein (Weinberger 2017):

Schutzgebiete: Vogelschutzgebiete, FFH-Gebiete (wasserabhängig)

- Vogelschutzgebiet und FFH-Gebiet von Quelle bis Eichelsdorf
- Vogelschutzgebiet und FFH-Gebiet hinter Nidda bis kurz vor Ober-Florstadt
- Vogelschutzgebiet zwischen Ilbenstadt und Okarben
- Vogelschutzgebiet hinter Karben bis kurz vor Dortelweil

Fischregionen

- Obere Forellenregion: Quelle bis Rainrod
- Untere Forellenregion: Rainrod bis kurz vor Unter-Schmitten
- Äschenregion: Kurz vor Unter-Schmitten bis Mitte zw. Unter-Schmitten und Nidda
- Barbenregion: Mitte zw. Unter-Schmitten und Nidda bis Mündung in den Main

Gewässergüte

- Quelle bis hinter Rudingshain: **sehr gut**
- Hinter Rudingshain bis Mitte zwischen Unter-Schmitten und Nidda: **gut**
- Mitte zwischen Unter-Schmitten und Nidda bis Assenheim: **mäßig**
- Assenheim bis Frankfurter Berg: **gut**
- Frankfurter Berg bis Anfang Praunheim: **mäßig**
- Anfang Praunheim bis Ende Rödelheim: **unbefriedigend**
- Ende Rödelheim bis Mündung in den Main: **mäßig** (kleiner Abschnitt: gut)

6.2 Wetter

Die Wetter ist ein Fluss in Hessen, der am Vogelsberg entspringt und nach knapp 70 km Länge in die Nidda mündet. Seine Quelle befindet sich am Rande des Vogelsbergs, zwischen Laubach und Schotten. Über Laubach fließt er durch Lich hindurch, südwestlich Richtung Griedel und von dort aus weiter gen Süden, bis er bei Niddatal-Assenheim in die Nidda mündet. Der Verlauf ist in Abbildung 15 zu sehen. Der Landkreis Wetterau ist nach dem Fluss, der hauptsächlich in diesem Landkreis fließt, benannt.

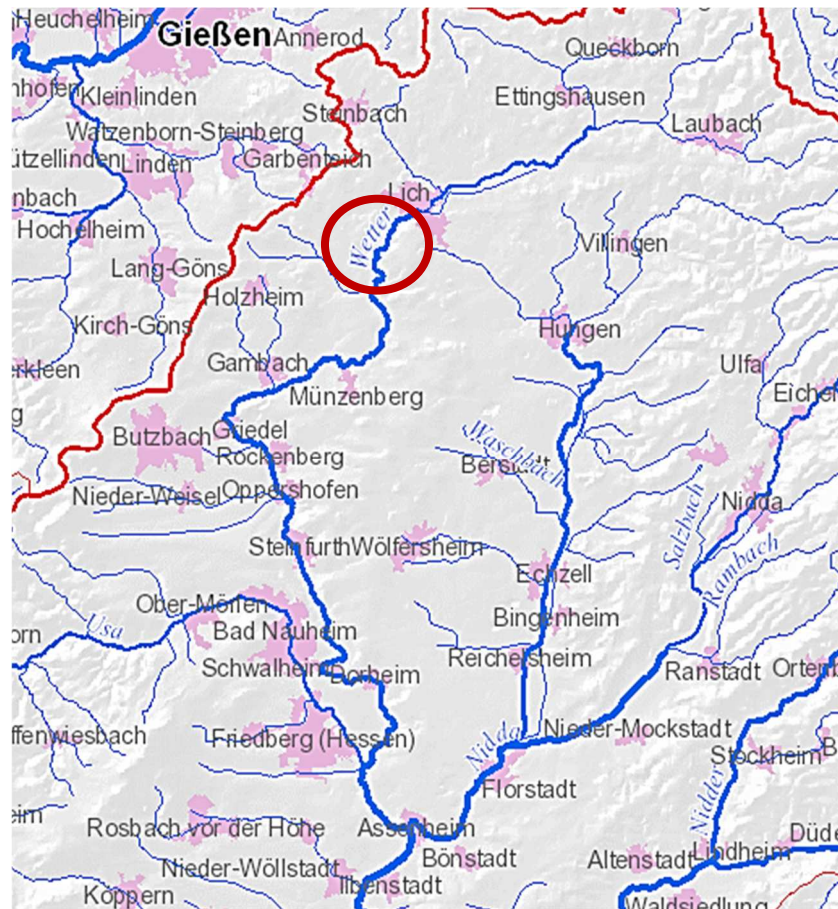


Abbildung 15: Flussverlauf der Wetter (Weinberger 2017)

Folgende Daten können für die Wahl der geeigneten Standorte des Wärmetauschers von Bedeutung sein (Weinberger 2017):

Schutzgebiete: Vogelschutzgebiete, FFH-Gebiete (wasserabhängig)

- Vogelschutzgebiet im Quellbereich und Laubach, inkl. FFH-Gebiet
- Vogelschutzgebiet zwischen Ober-Bessingen und Lich, inkl. FFH-Gebiet
- FFH-Gebiet im Bereich des Klosters Arnsburg
- Vogelschutzgebiet von Münzenberg (inkl. Trais-Münzenberg) bis Rockenberg, inkl. FFH-Gebiet
- Vogelschutzgebiet zwischen Steinfurth und Wisselsheim, inkl. FFH-Gebiet
- Vogelschutzgebiet zwischen Dorheim und Ossenheim

Fischregionen

- Obere Forellenregion: Quelle bis Kreuzung Bundesstraße 276
- Untere Forellenregion: Kreuzung Bundesstraße 276 bis Anfang Laubach
- Äschenregion: Anfang Laubach bis kurz vor Ober-Bessingen (Gästehaus Steinesmühle)
- Barbenregion: Gästehaus Steinesmühle bis zur Mündung

Schutzgebiete: Vogelschutzgebiete, FFH-Gebiete (wasserabhängig)

- FFH-Gebiet komplett entlang der Kinzig mit Ausnahme des Flusslaufs von Steinau bis zur Mündung der Orb in die Kinzig (bei Biebergemünd) und kurz vor der Mündung der Kinzig in den Main

Fischregionen

- Obere Forellenregion: Quelle bis kurz hinter Höhe Vollmerz
- Untere Forellenregion: Hinter Höhe Vollmerz bis Niederzell
- Äschenregion: Niederzell bis Bad Soden-Salmünster Hausen
- Barbenregion: Bad Soden-Salmünster Hausen bis Mündung in den Main

Gewässergüte

- Quelle / Sterbfritz: gut
- Sterbfritz bis Herloz (Schlüchtern): mäßig
- Herloz (Schlüchtern) bis hinter Kinzig-Stausee: gut
- Hinter Kinzig-Stausee bis hinter Wächtersbach: mäßig
- Hinter Wächtersbach bis Altenhaßlau (Linsengericht): gut
- Altenhaßlau (Linsengericht) bis hinter Rothenbergen: mäßig
- Hinter Rothenbergen bis hinter Kinzigsee: gut
- Hinter Kinzigsee bis kurz vor Mündung in den Main: mäßig
- Kurz vor der Mündung in den Main: gut

7 Anforderungen an die Fließgewässer

Die Anforderungen, die an geeignete Standorte für den Wärmetauscher gestellt werden, umfassen verschiedene Aspekte. Um einen nachhaltig angelegten Standort zu finden, müssen sowohl ökologische als auch sozio-funktionelle und ökonomische Bedingungen erfüllt sein. Das bedeutet, dass nicht nur der Schutz von Flora und Fauna als ökologische Komponente berücksichtigt werden soll, sondern auch ein wirtschaftlich sinnvoller Standort gewählt werden sollte. Außerdem muss beim nachhaltigen Ansatz darauf geachtet werden, dass die soziokulturelle und funktionelle Seite bedient wird, die Wärmepumpe also ihre Funktion gut erfüllen kann und andere Nutzungen des Fließgewässers noch immer gewährleistet sind.

7.1 Voraussetzungen für die Wärmequelle

Wärmepumpen, die die Wärme aus Umweltmedien entziehen und nutzbar machen können, können sich der Wärmequellen Erdreich, Wasser und Umgebungsluft bedienen. Dabei müssen konkrete Quellen verwendet werden, die folgende Kriterien erfüllen (Baumann et al.):

- Ausreichende Verfügbarkeit
- Möglichst hohe Wärmespeicherfähigkeit
- Möglichst hohes Temperaturniveau (in Bezug auf Gebäudebeheizung)
- Angemessene Temperatur der beeinflussten Wärmequelle
- Möglichst hohe spezifische Entzugsleistung
- Möglichst kohärenter Zeitgang von Wärmebedarf und –angebot
- Örtliche Verfügbarkeit der Wärmequelle
- Möglichkeit einer indirekten Kühlung
- Fähigkeit der temperaturbezogenen Regeneration (Hartmann und Schwarzbürger 2009)

Eine ausreichende Verfügbarkeit ist bei der Nutzung von Fließgewässern dahingehend gegeben, dass Fließgewässer regelmäßig und an vielen Städten auftreten. Eine hohe Wärmespeicherfähigkeit ist bei Wasser als Speichermedium ebenfalls vorhanden, da die Wärmekapazität im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten sehr hoch ist (vgl. Kapitel 3.4). Die Fähigkeit einer temperaturbezogenen Regeneration bzw. die Einstellung einer an-

gemessenen Mischungstemperatur wie auch die mögliche Entzugsleistung werden in der vorliegenden Arbeit untersucht. Ein Vergleich verschiedener Umweltmedien, wie sehr sie die übrigen, hier genannten Anforderungen an eine Wärmequelle erfüllen, findet sich als Anlage 9. Hier wird gezeigt, dass Fließgewässer prinzipiell als Wärmequelle geeignet sind und in Bezug auf die hier genannten Kriterien eine zu den anderen – teilweise schon etablierten - Möglichkeiten der Umweltwärmenutzung ebenbürtige Alternative darstellen.

7.2 Rechtliche Grundlagen (Ökologische Bedingungen)

Rechtliche Regelungen decken im Kontext der wärmeenergetischen Fließgewässernutzung schon viele Faktoren ab, vor allem die ökologischen. Ausschlaggebend sind hier die wasserhaushaltsrechtlichen Regelungen, die zu Beginn vorgestellt werden. Dennoch ist meist in jedem Einzelfall zu prüfen, ob diese Regelungen für die Gewährleistung gewässerökologischer Anforderungen ausreichen oder gegebenenfalls Einschränkungen verschärft werden sollten.

7.2.1 Wasserhaushaltsrechtliche Regelungen

Auf europäischer Ebene wurde mit der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) festgelegt, dass unter anderem Fließgewässer bis 2027 einen „guten Zustand“ erreichen sollen. Zur Erreichung des Ziels sind durch die Richtlinie drei Bewirtschaftungszyklen vorgegeben, in denen die beteiligten Länder verschiedene Aufgaben erfüllen sollen (Völker und Mohaupt 2016). Die Anforderungen der Richtlinie werden durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) in deutsches Recht umgesetzt, in dem Anforderungen an einen guten ökologischen Zustand an die Gewässer gestellt werden. In der Oberflächengewässerverordnung werden weiterhin die Anforderungen des WHG konkretisiert.

Das Wasserhaushaltsgesetz hat den Zweck, eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung zu gewährleisten (§ 1 WHG). Daher soll ein guter ökologischer wie auch ein guter chemischer Zustand von oberirdischen Gewässern erreicht - oder erhalten – sowie seine Verschlechterung vermieden werden (§ 27 Abs. 2 WHG). Der ökologische Zustand (siehe Anlage 7) wird dabei in fünf Zustandsklassen von „sehr gut“ bis „schlecht“ eingeteilt. Gegen das Verschlechterungsverbot wird verstoßen, wenn dem Gewässerzustand nach menschlichem Eingriff eine niedrigere Zustandsklasse zugeordnet wird. Zudem sind Eingriffe untersagt, wenn ein Gewässer noch keinen guten Zustand aufweist und durch den Eingriff verhindert wird, ihn jemals zu erreichen (Bellack et al. 2008).

Konkret bedeutet dies: „die Auswirkungen der in Rede stehenden Kühlwassernutzung auf die Gewässerfauna und –flora insgesamt, den Sauerstoffgehalt, den Temperaturhaushalt, die Strömungsverhältnisse etc. dürfen nicht so sein, dass die ökologische Entwicklungsfähigkeit hin zu einem guten Zustand dadurch ausgeschlossen wird.“ (Bellack et al. 2008)

Ganz allgemein ist die Gewässerbewirtschaftung nach § 12 WHG nicht erlaubt, wenn schädliche und nicht ausgleichbare Gewässerveränderungen zu erwarten sind.

Bei Kühlwasserentnahmen oder –einleitungen liegt eine Gewässerbenutzung nach § 9 WHG vor, daher bedarf es hier einer Erlaubnis nach § 8 WHG. Wassereinleitungen dürfen lediglich erlaubt werden, wenn sie keine nachteiligen Auswirkungen auf das Gewässer erwarten lassen bzw. § 12 wie auch § 57 WHG erfüllen. Werden dem Kühlwasser, das wieder eingeleitet wird, Additive beigegeben, so müssen auch Anforderungen der Abwasserverordnung erfüllt werden. Bei Wasserentnahmen gilt zusätzlich, dass eine Mindestabflussmenge gemäß § 33 WHG gewährleistet sein muss. Wird zur wärmeenergetischen Nutzung ein geschlossenes System verwendet, indem ein Wärmetauscher direkt ins Wasser eingelassen wird, entfallen diese Regelungen.

Die Anforderungen an einen guten ökologischen Zustand, die sich aus dem Wasserhaushaltsgesetz ergeben, werden für Fischgewässer in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) konkretisiert. Nach § 5 Abs. 4 OGewV sind gerade die biologischen Qualitätskomponenten für die Einstufung in die Zustandsklassen maßgebend. Diese werden stark von der Temperatur beeinflusst, weswegen Wärmeeinleitungen im Wasserrechtsverfahren sorgfältig bewertet werden müssen. Temperaturbezogene Anforderungen sind dabei der Anlage 7 der Oberflächengewässerverordnung zu entnehmen. Sie sind für einen guten Zustand (Anlage 10) und einen sehr guten Zustand (Anlage 11) der vorliegenden Arbeit angehängt. Die Anforderungen weichen voneinander ab je nach Fischlebensgemeinschaft, die einzelnen Fließgewässerabschnitten zugeordnet werden. Fischregionen, die für die Verordnung relevant sind, sind die obere Forellenregion (Sa-ER), die untere Forellenregion (Sa-MR), die Äschenregion (Sa-HR), die Barbenregion (EP), die Brachsenregion (MP) und die Kaulbarsch-Flunder-Region (HP) sowie cyprinidengeprägte Gewässer (Cyp-R) (Schlag 2017). Überschreitungen der in der Verordnung aufgeführten Werte führen zu einer Gefährdung der jeweiligen Fischlebensgemeinschaft und zur Abstufung in der ökologischen Zustandsklasse (Bellack et al. 2008).

7.2.2 Fischgewässerrechtliche Regelungen

Die EG-Fischgewässerqualitätsrichtlinie – basierend auf der EG-Fischgewässerrichtlinie – gibt Temperaturbegrenzungen für Salmoniden- und Cyprinidengewässer an und sieht vor, dass die Mitgliedstaaten ihre Gewässer in die beiden Gewässerkategorien unterteilen. Dabei werden die temperatur- als auch sauerstoffbezogenen Grenzwerte nach Gewässertyp auf folgende Werte festgelegt:

Tabelle 4: Grenzwerte für Salmoniden- und Cyprinidengewässer (Bellack et al. 2008)

	Salmonidengewässer	Cyprinidengewässer
Max. T_G [°C]	21,5	28,0
Max. ΔT_G [K]	1,5	3,0
Mind. mg/l O_2	5	7

Laut hessischer Fischgewässerverordnung (FischgewV) werden diejenigen Gewässer als Cyprinidengewässer bezeichnet, in denen Fischarten wie Cypriniden, Hechte, Barsche und Aale leben können. In Salmonidengewässern sind Fische wie Lachse, Forellen, Äschen und Renken lebensfähig (§ 2 FischgewV). Seit Dezember 2013 ist die Fischgewässerverordnung allerdings nicht mehr gültig, außerdem werden die Gewässerabschnitte in der OGewV spezifischeren Fischregionen zugeordnet, was die Festlegung von Grenzwerten realistischer macht.

7.2.3 Empfehlungen für Temperatur- und Sauerstoffgrenzwerte

Nicht gesetzlich geregelt sind die maximale Kühlwassertemperatur bzw. die Temperatur der Wassermenge, der Wärme hinzugegeben wird, wie auch die minimale Gewässertemperatur und maximale Abkühlspanne. Zu Hilfe können hier Empfehlungen, Experten-Schätzwerte oder vergleichbare Werte aus anderen Bundesländern genommen werden.

Als maximale Kühlwassertemperatur kann 30 °C angenommen werden, dies ist ein Richtwert nach (Maniak 2010); außerdem werden die Einleittemperaturen verschiedener Herkunft in bayerischen Merkblättern gleichermaßen begrenzt (LfU 2011).

Die minimale Gewässertemperatur kann nach (Glatzel und Heise 1980) abhängig von der Unterbringung des Wärmetauschers bis 4 °C oder direkt bis an den Gefrierpunkt genutzt werden. Ausgehend vom potenziellen Wärmetauscher (vgl. Kapitel 4.4) liegt

das Minimum der Vorlauftemperatur bei 4 °C, abkühlen kann die Wassermenge bis auf 0 °C.

Nach (Glatzel und Heise 1980) wird weiterhin eine maximale Abkühlspanne von 3 bis 5 K empfohlen, um eine plötzliche, zu starke Abkühlung zu vermeiden. In der vorliegenden Arbeit wird mit einer Abkühlspanne von 3 K gerechnet, um auf der sicheren Seite zu liegen.

7.2.4 Naturschutzrechtliche Regelungen

Im Wasserhaushaltsgesetz wird festgesetzt, dass bei der Gewässerbewirtschaftung auch die naturschutzrechtlichen Vorgaben Beachtung finden müssen (§ 12 WHG), gerade im Hinblick auf die Fischfauna.

Die Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) wie auch die Vogelschutzrichtlinie weisen besondere Schutzgebiete aus (Natura 2000), in denen ein günstiger Erhaltungszustand der natürlichen Lebensräume sowie der Tier- und Pflanzenarten wiederhergestellt oder bewahrt werden soll. Nach Vorschriften Badens-Württembergs gelten Veränderungen des Wasserhaushalts (z.B. Veränderungen von Fließgewässern) wie auch die Wärmebelastung von Gewässern bei gegen Wärme empfindlichen Arten als mögliche erhebliche Beeinträchtigungen von Lebensraumtypen und Lebensstätten (Schneider 2002). Entsprechend ist auch aus naturschutzrechtlicher Hinsicht auf eine sorgsame Gewässerbewirtschaftung zu achten.

7.3 Anforderungen durch den Wärmetauscher

Probleme für den Wärmetauscher, die damit einhergehen können, dass er direkt ins Fließgewässer eingesetzt wird, sind vor allem Bewuchsprobleme. Je langsamer das Wasser fließt, desto stärker ist die organische Belastung der Apparatur. Entsprechend ist ein Standort für den Wärmetauscher ratsam, der größere Fließgeschwindigkeiten aufweist. Außerdem spielt hier auch die Gewässergüte eine Rolle. Je stärker das Fließgewässer selbst mit organischen Substanzen belastet ist, desto größer ist auch die Belastung für den Wärmetauscher. Da meist mit der Herabstufung der Güteklasse auch die organische Belastung steigt, gilt: Ab einer Güteklasse II/III (kritisch belastet) sind die Beeinträchtigungen für den Wärmetauscher als kritisch anzusehen und wenn möglich zu vermeiden (Glatzel und Heise 1980).

Weiterhin ist der Einsatz der Wärmepumpe nicht mehr zu empfehlen, wenn das Gewässer die Temperatur von 4 °C unterschreitet, da ab dieser Temperatur Vereisungen innerhalb der Wärmepumpe auftreten können (Glatzel und Heise 1980).

Konkretisiert werden können die Anforderungen, wenn man vom potenziell einsetzbaren Wärmetauscher aus Kapitel 4.4 ausgeht. Demnach sollten Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 3,0 m/s vorherrschen, die Fließtiefe muss mindestens 0,8 m betragen und die Vorlauftemperaturen dürfen 4 °C nicht unterschreiten (Borchardt 2017).

7.4 Sonstige Anforderungen

Beim Einsatz eines Wärmetauschers sollten auch andere Gewässernutzungen weiterhin möglich sein. Beispielsweise sollte die Durchgängigkeit für Schiffe und auch Fische gewährleistet sein. Wenn der Wärmetauscher nahe am Ufer positioniert wird, sollte es den Schiffen möglich sein, das Fließgewässer weiterhin zu passieren. Für Fische stellt ein Wärmetauscher keine Einschränkung in der Durchwanderbarkeit des Fließgewässers dar, da es den Fischen möglich ist, um das Hindernis herum zu schwimmen. Darauf, dass Fische nicht in den Wärmetauscher hineingelangen, ist hingegen unbedingt zu achten. Diese Aufgabe fällt allerdings in den Bereich der Gestaltung des Wärmetauschers und nicht in den der Standortwahl.

Es sollte weiterhin auf die Möglichkeit einer guten Durchmischung der Wassermengen unterschiedlicher Temperatur geachtet werden. Demnach wäre zum Beispiel ein Standort unmittelbar vor einem (Stau-)See ungünstig, da hier keine Durchmischung durch Turbulenz stattfinden kann. Die Fließgeschwindigkeit spielt ebenfalls eine Rolle, da auch bei sehr langsam fließendem Wasser eine Durchmischung schwer ist.

Augenmerk bei der Standortwahl sollte zudem auf den ökonomischen Gesichtspunkt gelegt werden. Die Aspekte, die für einen ökonomisch sinnvollen Standort beachtet werden sollten, beziehen sich darauf, die Kosten während des Betriebs so gering wie möglich zu halten. Dabei sollten zum einen Ausgleichszahlungen vermieden werden. Verlieren Fischereirechte durch Minderung der fischereilichen Ergiebigkeit an Wert, gerade in Bezug auf fischereilich bedeutsame Arten wie Äschen oder Forellen, so muss ein finanzieller Ausgleich gewährleistet werden (Bellack et al. 2008). Dieser Aspekt kann bei der Standortwahl zuvor geprüft werden. Zum anderen ist es ökonomisch effizient, den Wärmetauscher in der Nähe von besiedelten Flächen ins Fließgewässer einzu-

setzen, um längere Transportwege der Wärme zu verhindern. Kürzere Transportwege bedeuten weniger Reibungsverluste und geringerer Einsatz elektrischer Energie für den Wärmetransport. Demnach führen kürzere Transportwege zu geringeren Energieverlusten und höherem Wirkungsgrad; damit steigt unweigerlich die ökonomische Effizienz.

8 Potenzialanalyse

8.1 Ansatz

Im Folgenden wird die Berechnung der Wärmeenergetischen Leistungsfähigkeit von den ausgewählten Fließgewässern wie auch ihre Bewertung erarbeitet. Dabei werden grundsätzlich die Fälle „Kühlfall“ (die Gebäude werden gekühlt, dem Fließgewässer wird also Wärme hinzugefügt) und „Heizfall“ (die Gebäude werden beheizt, aus dem Fließgewässer wird also Wärme entnommen) unterschieden. Zusätzlich kann jeweils zwischen Winter- und Sommerzeiten differenziert werden. Dabei orientieren sich diese Zeiten nach der Oberflächengewässerverordnung, in der die Sommerzeit von April bis November und die Winterzeit von Dezember bis März definiert sind. Da im Winter ein Gebäude nicht gekühlt werden muss (im Sommer hingegen durchaus Warmwasser benötigt wird), wird der Kühlfall im Winter außer Acht gelassen. Untersucht werden demnach die Fälle:

1. Kühlfall a) in der Sommerzeit
2. Heizfall a) in der Sommerzeit b) in der Winterzeit

Um das Potenzial zu berechnen, sind die Fallunterscheidungen Kühlfall und Heizfall relevant - je nach Sommer- oder Winterzeit variieren lediglich die Werte. Die Berechnung des Potenzials erfolgt auf Grundlage der Formel $P = \rho Q c \Delta T$ (vgl. Kapitel 3.4). Speziell die Wärmeenergetische Leistung, die im Wärmetauscher durch das Fließgewässer ermöglicht wird, errechnet sich durch

$$\text{Kühlfall: } P_{WT} = \rho Q_{WT} c_p (T_{WT} - T_{Gew}) \quad (16)$$

$$\text{Heizfall: } P_{WT} = \rho Q_{WT} c_p (T_{Gew} - T_{WT}) \quad (17)$$

ρ : Dichte des Wassers [kg/m^3],
 $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
 c_p : spezif. Wärmekapazität des Wassers [$\text{kJ}/(\text{kg K})$], $c_p = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Q_{WT} : Durchfluss Wärmetauscher [m^3/s]
 T_{WT} : Temperatur unmittelbar hinter dem Wärmetauscher [$^{\circ}\text{C}$]
 T_{Gew} : ursprüngliche Temperatur des Gewässers [$^{\circ}\text{C}$]

Abbildung 17 visualisiert die zugrunde liegende Idee, dass Wasser mit der Gewässertemperatur T_{Gew} anströmt und in den Wärmetauscher gelangt; im Wärmetauscher wird dem Wasser Wärme entzogen oder hinzugefügt, sodass es mit einer Temperatur T_{WT} aus

dem Wärmetauscher austritt. Dahinter stellt sich die Mischungstemperatur T_M ein. Die Leistung wird im Wärmetauscher erbracht – also in dem Bereich, in dem das Wasser von der Gewässertemperatur auf die Temperatur am Ausgang des Wärmetauschers gebracht wird.

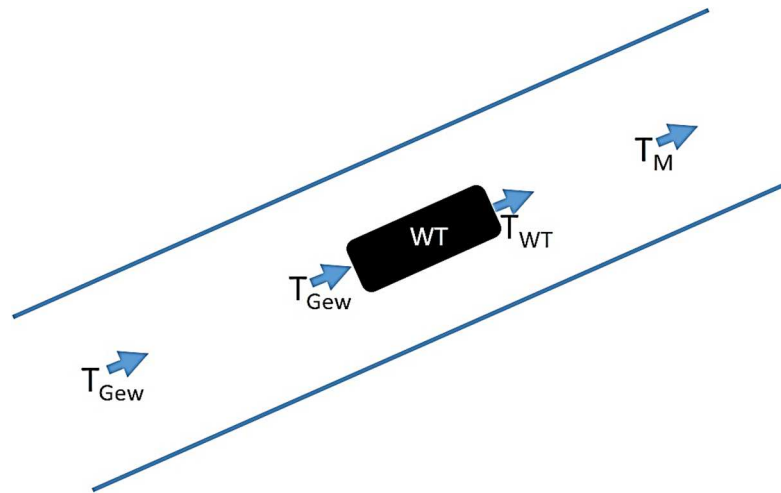


Abbildung 17: Modellvorstellung für die Berechnungen

Wie Kapitel 7 zu entnehmen, unterliegt die wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern Regeln, insbesondere bezüglich der Temperatur. Die Aufheizung oder Abkühlung des Gewässers ist beschränkt, demnach müssen Einschränkungen für die erwärmte oder abgekühlte Temperatur T_{WT} am Ende des Wärmetauschers gelten. Diese ist zu ermitteln mithilfe des Ansatzes für die Mischungstemperatur von zwei Medien unterschiedlicher Temperatur (Richmannsche Mischungsregel). Dieser besagt, dass die Wärmemenge (Q_W), die vom wärmeren Medium abgeht, um das Niveau der Mischungstemperatur zu erreichen, die gleiche ist, die auf das kältere Medium übergeht, um auf jenes Niveau zu gelangen. In diesem Fall muss also gelten:

$$Q_{W,WT} = Q_{W,Gew} \quad (18)$$

Die Formeln für den Kühl- und den Heizfall weichen hier leicht voneinander ab:

Kühlfall

$$m_{WT}c_{p,WT}(T_{WT} - T_M) = m_{Gew}c_{p,Gew}(T_M - T_{Gew}) \quad (19)$$

m_{WT} : Wassermasse innerhalb des Wärmetauschers [kg]

m_{Gew} : Masse des den Wärmetauscher umgebenden Wassers [kg]

Da es sich auf beiden Seiten der Gleichung um die spezifische Wärmekapazität von Wasser handelt, fällt die Konstante c weg. Mit $T_M - T_{Gew} = \Delta T_{möglich}$ und $T_M = T_{Gew} + \Delta T_{möglich}$ formen wir nach T_{WT} um und erhalten:

$$T_{WT} = \frac{m_{Gew}}{m_{WT}} \Delta T_{möglich} + T_{Gew} + \Delta T_{möglich} \quad (20)$$

Mit $m = \rho V = \rho Q t$, $Q = vA$ und $v_{WT} = 0,5 v_{Gew}$ (s. Ende dieser Seite) ergibt sich

$$T_{WT} = \frac{2 A_{Gew}}{A_{WT}} \Delta T_{möglich} + T_{Gew} + \Delta T_{möglich} \quad (21)$$

Heizfall:

$$m_{WT} c_{p,WT} (T_M - T_{WT}) = m_{Gew} c_{p,Gew} (T_{Gew} - T_M) \quad (22)$$

Mit $T_{Gew} - T_M = \Delta T_{möglich}$ und $T_M = T_{Gew} - \Delta T_{möglich}$ sowie der obigen Umrechnung für die Masse m ergibt sich für den Heizfall:

$$T_{WT} = -\frac{2 A_{Gew}}{A_{WT}} \Delta T_{möglich} + T_{Gew} - \Delta T_{möglich} \quad (23)$$

In den verwendeten Formeln wird dabei von der Vereinfachung ausgegangen, dass $Q_{Gew} - Q_{WT} \approx Q_{Gew}$ und entsprechend $A_{Gew} - A_{WT} \approx A_{Gew}$.

8.2 Erfassung der Daten

Die Gleichungen zur Temperatur T_{WT} sowie zur Leistung P_{WT} (Gleichungen 16, 17, 21 und 23) zeigen die Größen, die für deren Berechnung notwendig sind. Dabei sind die Dichte des Wassers und die spezifische Wärmekapazität des Wassers bekannte Konstanten. Benötigt werden der Durchfluss im Wärmetauscher, die Gewässertemperatur, die Querschnitte von Fließgewässer und Wärmetauscher sowie die maximal zulässige Erwärmung oder Abkühlung des Gewässers. Teilweise wurden Werte beim Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) eingeholt. Die Werte stammen aus Messungen größtenteils seit 2011, mindestens jedoch seit 2014.

Durchfluss im Wärmetauscher Q_{WT}

Es wird angenommen, dass die Fließgeschwindigkeit im Wärmetauscher etwa der halben Fließgeschwindigkeit im Gewässer entspricht (bedingt durch Reibung und Druckverluste im Wärmetauscher). Demnach gilt:

$$v_{WT} = 0,5 v_{Gew} \Leftrightarrow \frac{Q_{WT}}{A_{WT}} = 0,5 \frac{Q_{Gew}}{A_{Gew}} \Leftrightarrow Q_{WT} = Q_{Gew} \frac{A_{WT}}{2 A_{Gew}} \quad (24)$$

Das bedeutet, dass der Durchfluss im Wärmetauscher mitunter abhängig vom Gewässerdurchfluss ist. Entlang der Fließgewässer befinden sich Pegel, die unter anderem den lokalen Gewässerdurchfluss aufzeichnen. Diese Werte wurden beim HLNUG eingeholt.

Gewässertemperatur

Auch diese Werte konnten punktweise (pegelweise) beim HLNUG eingeholt werden.

Querschnitt des Wärmetauschers

Der Durchmesser des Wärmetauschers beträgt 0,6 m (vgl. Kapitel 4.4). Der Querschnitt ergibt sich mit $A = 0,25 \times \pi d^2$ zu etwa 0,283 m².

Querschnitt des Fließgewässers

Für den Querschnitt des Fließgewässers wurden vom HLNUG pegelweise Werte zum Querprofil und dem Wasserstand zur Verfügung gestellt. Mit annähernden Trapezen als Querschnitte konnten diese mit $A = 0,5(a + c) \times h$ berechnet werden (für diese Formel gilt a: Grundseite 1, c: Grundseite 2, h: Höhe des Trapezes).

Maximal zulässige Erwärmung oder Abkühlung

Die maximal zulässige Erwärmung ist, wie in Kapitel 7.2.1 angesprochen, in der Oberflächengewässerverordnung geregelt. Dabei werden je nach Fischregion eine maximale Gewässertemperatur und eine maximale Aufwärmspanne vorgegeben, wovon die strengere maßgebend ist. Die Werte unterscheiden sich auch abhängig davon, ob ein sehr guter (Anlage 10) oder guter ökologischer Zustand (Anlage 11) vorliegt; da die zu berechnenden Bereiche einen guten oder einen darunter liegenden ökologischen Zustand aufweisen, wird mit den Werten für einen guten Zustand gerechnet. Damit ist gewährleistet, dass keine Verschlechterung der Gewässergüte möglich ist. Für eine maximal zulässige Abkühlung gibt es keine gesetzlichen Grenzwerte, sondern es sind Empfehlungen der Literatur zu entnehmen (vgl. 7.2.3). Den hier vorliegenden Berechnungen liegen eine Minimaltemperatur von 0 °C und eine maximale Abkühlspanne von 3 K zugrunde.

8.3 Berechnungen und Auswertung

Prinzipiell erfolgen die Berechnungen mit Excel. Um diese nun durchzuführen, werden die erhaltenen Daten den verschiedenen Orten zugeordnet. Nicht zu jedem Ort mit Pegel im Fließgewässer sind alle Messwerte vorhanden. Entsprechend müssen Annahmen für die fehlenden Werte getroffen werden. Liegen die Orte weit voneinander entfernt, werden auch Werte dazwischen angenommen. Für einige Größen ist die Abschätzung eines linearen Werteverlaufs zwischen den Orten möglich. Der lineare Verlauf kann jedoch nur dann angenommen werden, wenn die vorhandenen Werte in etwa diesen Verlauf zulassen und außerdem genügend Werte vorhanden sind, damit die Abschätzung eines linearen Verlaufs keine größeren Abweichungen mit sich zieht. Dies trifft auf die Gewässertemperatur, den Durchfluss und den Wasserstand zu.

Die einzelnen Werte der Querschnitte lassen dahingegen weniger den Schluss eines linearen Verlaufs zu. Während sich die Werte zu Beginn des Fließgewässers ähneln, steigen sie im späteren Flussverlauf umso schneller an. Mittels linearer Regression werden Formeln für die Nidda und die Wetter ermittelt, mit denen die fehlenden Werte angenähert werden können. Für die Kinzig ist nur das Querprofil am Pegel in Hanau bekannt. Um dennoch eine Abschätzung der Wärmeenergetischen Leistungsfähigkeit zu ermöglichen, wird die Funktion zur Ermittlung der Zwischenwerte abgeschätzt. Da sowohl die Funktion der Querschnitte der Nidda als auch die der Wetter einer x^4 -Funktion ähneln, wird auch hier ein solcher Verlauf angenommen mit den Randbedingungen, dass der Querschnitt an der Quelle annähernd Null ist, der Querschnitt bis etwa 15 km stärker angestiegen ist und der Querschnitt in Hanau dem gemessenen Wert entspricht. In Anlage 12 ist die Ähnlichkeit der Kurven zu sehen. Um groben Vergleichsfehlern vorzubeugen, wurden die Berechnungen auch einmal mit ungünstigen Querschnitten durchgeführt und die Ergebnisse zeigten ähnliche Tendenzen. Ungünstige Querschnitte entsprechen hier großen, da bei gleichen Abfluss und größerem Querschnitt die Fließgeschwindigkeit kleiner angenommen wird und damit der Durchfluss im Wärmetauscher kleiner würde. Um die Möglichkeit der Realitätsnähe zu behalten, wurden die Vergleiche jedoch auf die Werte der x^4 -Funktion gestützt. Da dies dennoch Abschätzungen sind, werden die Werte der Kinzig damit unsicherer als in den beiden anderen Fließgewässern. Eine Plausibilität der angenommenen Werte wäre gegebenenfalls durch probenweise eigenständige Messungen zu überprüfen.

Die Bestimmung der Wärmeenergetischen Leistungsfähigkeit des Fließgewässers erfolgt abschnittsweise, d.h. dass jeweils der Bereich um einen Ort, der mit Werteangaben oder –annahmen ausgestattet ist, dieselben Werte zugeordnet bekommt. Die Bereiche werden prinzipiell immer so angenommen, dass sie in der Mitte zwischen dem vorherigen Ort und dem Ort, dessen Werte sie zugewiesen bekommen, beginnen und in der Mitte des Ortes und dem nachfolgenden Ort enden (Fall 1). Sollte in diesem Bereich ein Wechsel der Fischregion liegen, so wird der Bereich entsprechend angepasst (Fall 2). Beispielhaft sind die Fälle 1 und 2 in Abbildung 18 gezeigt:

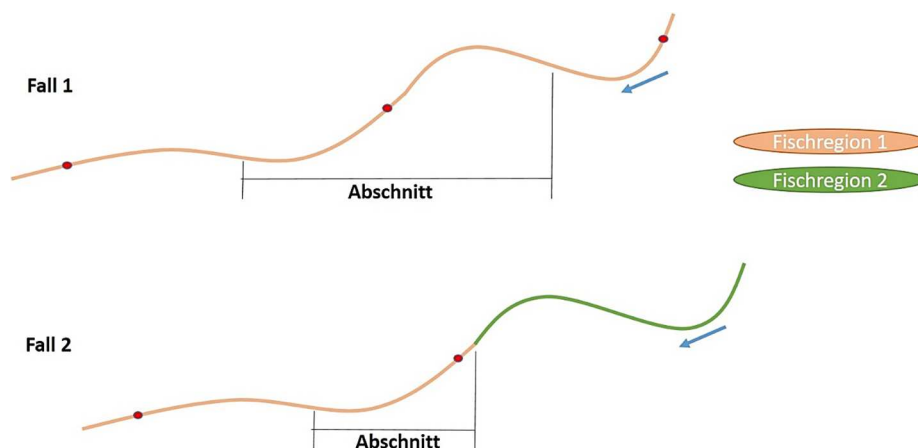


Abbildung 18: Wahl der Fließgewässerabschnitte

Allgemein wird bei den Berechnungen nicht das Prinzip angewendet, ungünstige Werte zu wählen, um sichere Mindestwerte zu erhalten, sondern möglichst realitätsnahe Werte zu erhalten, damit ein Vergleich der Potenziale überhaupt sinnvoll ist und somit eine wirtschaftliche Wahl des Standorts getroffen werden kann.

Beispielhafte Rechnung für die Nidda: Unter-Schmitten, Kühlfall im Sommer

Für Unter-Schmitten liegen Daten zur Gewässertemperatur, zum Durchfluss, zum Wasserstand und zum Querprofil vor. Das Fließgewässer auf Höhe von Unter-Schmitten ist der Äschenregion (Fischregion) zugeordnet, laut OGewV gilt dementsprechend für die maximale Temperatur ein Wert von $21,5^{\circ}\text{C}$, als maximale Aufwärmspanne sind $1,5\text{ K}$ zugelassen. Im Fall Unter-Schmitten ist die maximale Aufwärmspanne maßgebend. Aus Wasserstand und Querprofil lässt sich der Fließgewässerquerschnitt errechnen. Aus den Informationen lässt sich eine Temperatur am Ende des Wärmetauschers (TWT) von $46,3^{\circ}\text{C}$ errechnen. Da die „Einleitungstemperatur“ maximal 30°C betragen darf (vgl. Kapitel 7.2.3), wird an dieser Stelle das Potenzial mit einer Temperatur von 30°C be-

rechnet - entsprechend stellt sich bei Erwärmung des Wassers im Wärmetauscher auf nur 30 °C nicht die maximal zulässige Mischwassertemperatur im Gewässer ein. Mit den gegebenen und errechneten Werten wird eine mögliche Wärmeenergetische Leistung von etwa 3600 kW ermittelt.

Tabelle 5: Wichtige Werte für das Wärmepotenzial am Beispiel von Unter-Schmitten

Ort	$\Delta T_{\text{möglich}}$	T_{WT}	P_{WT}
Unter-Schmitten	1,5 K	30 °C	3600 kW

Auswertung

In Abbildung 19 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Zu erkennen sind die Daten der Orte, die für die abschnittsweise Berechnung relevant sind. Zunächst wird zwischen den drei Fällen „Kühlfall Sommer“, „Heizfall Sommer“ und „Heizfall Winter“ unterschieden. Hier werden die Werte pro Fall verglichen und jeweils die besten 40 % grün markiert. In der Spalte rechts daneben sind die Leistungen für jeden Ort aufsummiert. Dieser Schritt hilft, um die Leistungsfähigkeit der Fließgewässerabschnitte an den verschiedenen Orten gesamtheitlich vergleichen zu können. So soll verhindert werden, dass ein Standort ausgewählt wird, der in einem Fall zwar den Spitzenwert aufweist, in der übrigen Zeit jedoch kaum einen Nutzen hat. Der farbliche Verlauf von grün über gelb bis rot zeigt an, wie gut bis hin zu schlecht die Werte im Vergleich zueinander sind. Die letzte Spalte zeigt die Werte, die zu betrachten sind, wenn man davon ausgeht, dass für den vorgesehenen Wärmetauscher eine Fließgewässertiefe von 0,8 m notwendig ist.

Vergleicht man nun für jeden Ort die Summe der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Fälle, so kann Folgendes festgehalten werden:

- Insbesondere die Kinzig und teilweise die untere Hälfte des Nidda-Flusslaufs erzielen die besten Ergebnisse. Hier sind für die Kinzig vor allem die Fließgewässer-Abschnitte zwischen Bad Soden-Salmünster und Hanau zu nennen, für die Nidda sind Ilbenstadt und Karben erwähnenswert.
- Im Vergleich schlechte Werte erhält die Nidda in der oberen Hälfte ihres Flusslaufs. Die niedrigsten Werte im Gesamtheitlichen erzielt die Wetter, und zwar vor allem zu Beginn und am Ende ihres Flusslaufs. Mittelmäßig schneidet sie im restlichen Bereich ab.

Im Vergleich der Werte für die einzelnen Fälle sieht die Situation ähnlich aus. Auch hier steht die Kinzig sehr gut dar; der Fließgewässerabschnitt der Nidda zwischen Nieder-Florstadt und Bad Vilbel folgt nach mit ebenfalls guten Werten. Hintenan stehen sowohl die gesamte Wetter als auch die obere Hälfte der Nidda.

	Orte	Potenzial Kühlfall Sommer [kJ/s]	Potenzial Heizfall Sommer [kJ/s]	Potenzial Heizfall Winter [kJ/s]	Summe der Potenziale [kJ/s]	Summe der möglichen Potenziale [kJ/s]
Nidda	Schotten	1880	3760	3710	9350	
	Rainrod	4420	3040	1920	9380	
	Eichelsdorf	3930	3120	1850	8900	
	Unter-Schmitten	3610	2770	1860	8240	
	Nidda	3100	2380	1710	7190	
	Nieder-Florstadt	4190	3860	2840	10890	
W	Ilbenstadt	8940	8070	3870	20890	
	Karben	7790	7340	2820	17950	
S	Bad Vilbel	4640	4560	2310	11500	11500
	Frankfurt-Nied	3180	4300	2380	9860	9860
Wetter	Münster	2290	1730	1050	5070	
	Ober-Bessingen	3020	2290	1170	6480	
	Muschenheim	5580	4310	1870	11750	
	Rockenberg	5200	4230	2780	12210	
	Rödgen	4470	3820	2120	10410	
	Bruchenbrücken	2430	2180	1320	5930	
Kinzig	Steinau	2120	1730	1410	5260	
	Ahl	5020	4080	3200	12300	
	Bad Soden-Salmünster	6500	5260	4320	16080	
	Mitte BSS/Gelnh.	8230	6600	5480	20300	
	Gelnhausen	9200	7310	5940	22450	22450
	Mitte Gelnh./Hanau	7400	6040	4380	17820	17820
S	Hanau	5430	4540	3000	12970	12970
	Hanau Mündung	5360	4300	2400	12050	12050
Ergebnisse auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden						

Abbildung 19: Übersicht der Berechnungsergebnisse für die Leistungsfähigkeit

Im Anhang (Anlage 13 bis Anlage 21) sind die Leistungspotenziale unterschieden nach Fließgewässern und Fällen entlang der kompletten Fließgewässerrläufe dargestellt. Dabei wird pro Fall (fließgewässerübergreifend) farblich jeweils differenziert zwischen dem besten Drittel (grün dargestellt), dem Mittelmaß (gelb dargestellt) und dem schlechtesten Drittel (rot dargestellt).

9 Wahl geeigneter Standorte

Um geeignete Standorte für das Platzieren des Wärmetauschers zu wählen, werden verschiedene Aspekte betrachtet, die stark an den beschriebenen Anforderungen (vgl. Kapitel 7) anlehnen.

Prinzipiell sollten potenzielle Standorte so gewählt werden, dass hier der Fließgewässerabschnitt möglichst hohe Leistungsfähigkeiten aufweist. Mit diesem Kriterium wären auf den ersten Blick insbesondere die Kinzig zwischen Bad Soden-Salmünster und Hanau sowie die Nidda von Ilbenstadt bis Bad Vilbel geeignet.

Im Falle des hier vorgestellten Wärmetauschers ist Ausschlusskriterium das Nichterreichen einer Wassertiefe von 0,8 m. Abbildung 19 zeigt in der ersten Spalte, ab welchem Ort das Fließgewässer im Winter (W) und im Sommer (S) jene Wassertiefe erreicht. Während im Winter noch einige mehr Fließgewässerabschnitte dieses Kriterium erfüllen, kommen im Sommer deutlich weniger Standorte in Betracht. Da eine ganzjährige Nutzung des Wärmetauschers sinnvoll ist, werden Orte betrachtet, in denen auch im Sommer die Mindestwassertiefe erreicht wird. Unter dieser Bedingung kann die Wetter nicht genutzt werden, bei der Nidda ist ab Bad Vilbel, bei der Kinzig ab der Mitte zwischen Gelnhausen und Hanau eine Nutzung möglich (siehe letzte Spalte in Abbildung 19).

Unter Betrachtung der Leistungsfähigkeit ist der Standort um **Gelnhausen** zu wählen. Unter gesamtheitlicher Betrachtung aller Fälle ist die Leistungsfähigkeit des Fließgewässers hier am größten. Dies trifft auch auf eine Einzelfallbetrachtung zu. Das Kriterium der Mindestwassertiefe von 0,8 m ist dabei ebenfalls erfüllt. Flusswärts Richtung **Hanau** sind die Werte des Leistungspotenzials weiterhin gut, weswegen auch hier ein Standort möglich wäre.

Möchte man einen Standort an der Nidda aufzeigen und damit die Möglichkeiten des Wärmetauscher-Einsatzes auszudehnen, ist das Gebiet um **Bad Vilbel** zu wählen – ab hier ist eine Wassertiefe von 0,8 m vorhanden und die Leistungsfähigkeit ist im prinzipiell möglichen Bereich am größten.

Sollte durch den Einsatz eines modifizierten Wärmetauschers auch die wärmeenergetische Nutzung der Fließgewässerabschnitte möglich sein, die keine Wassertiefe von 0,8 m erreichen, so wäre auf jeden Fall ein Standort um **Ilbenstadt** zu wählen. Leis-

tungstechnisch ist Ilbenstadt ähnlich wie Gelnhausen anzusiedeln: Sowohl in der gesamtheitlichen Betrachtung als auch in den einzelnen Fällen ist Ilbenstadt sehr gut aufgestellt.

Sowohl Ilbenstadt als auch Gelnhausen (bis Hanau) können insbesondere gute Werte für den Heizfall im Winterfall aufweisen, der bei der Überlegung, eine Wärmepumpe einzusetzen, ausschlaggebend sein sollte.

Im Folgenden werden ausgewählte Orte detaillierter betrachtet, um jeweils einen genauen Standort zu ermitteln. Dabei ist ein großer ökonomischer und funktionaler Aspekt, den Standort so zu wählen, dass die gewonnene Wärme auf kürzestem Weg zu Gebäuden gelangt, um größere Transportverluste zu vermeiden. Weitere Idee ist es, alte Mühlkanäle zu verwenden, um hier den Wärmetauscher zu installieren. Mühlkanäle sind Kanäle, die vom natürlichen Fließgewässer abzweigen – meist mittels Stauwehr-, Wasser zu einer Mühle führen, und schließlich wieder im natürlichen Gewässer münden. Sie haben den Vorteil, dass sie durch ihre Funktion, Wasser für Mühlen nutzbar zu machen, oftmals größere Wassertiefen, größere Wasservolumina und höhere Strömungsgeschwindigkeiten zu erreichen versuchen. Problematisch kann aber gleichzeitig sein, dass das Wasser durch die vorgeschaltete Mühle oder eine Wasserkraftanlage bis zum Erreichen des Wärmetauschers schon gebremst ist und lediglich ein geringerer Durchfluss vorhanden ist; zudem wird die Idee, ein weiteres Bauteil – neben dem Stauwehr und der Wasserkraftanlage/Mühle - im Wasser zu installieren, von den Behörden oftmals aus naturschutztechnischer Sicht abgelehnt. Da vor allem Fische ohnehin schon stark beeinträchtigt werden, wird eine zusätzliche Belastung meist nicht empfohlen (Schemer 2017). Erfahrungen über den Einsatz eines Wärmetauschers in einem Mühlkanal der Wetter sind der Anlage 22 zu entnehmen.

Ilbenstadt (Nidda)

Ilbenstadt – als Ort mit sehr hohem Leistungspotenzial im Fließgewässer, allerdings nicht ausreichender Fließtiefe – liegt direkt hinter einer Kläranlage. Nach (Thomas Buch 2017) ist die Untere Wasserbehörde Wetteraukreis über das Projekt an der Wetter (siehe Anlage 22) erfreut, da hier Wärme, die durch zwei oberhalb liegende Kläranlagen in das Gewässer geleitet wird, durch den Wärmetauscher teilweise wieder entzogen werden kann (vgl. Kapitel 5.2). Dies könnte auch hier der Fall sein. Da hier keine größeren Zuflüsse in die Nidda münden und auch kein Mühlkanal in der Nähe ist, liegt

es nahe, den Wärmetauscher direkt an die Stelle zu setzen, an der Gebäude in Ufernähe aufzufinden sind. Der vorgeschlagene Standort ist in Abbildung 20 zu finden.

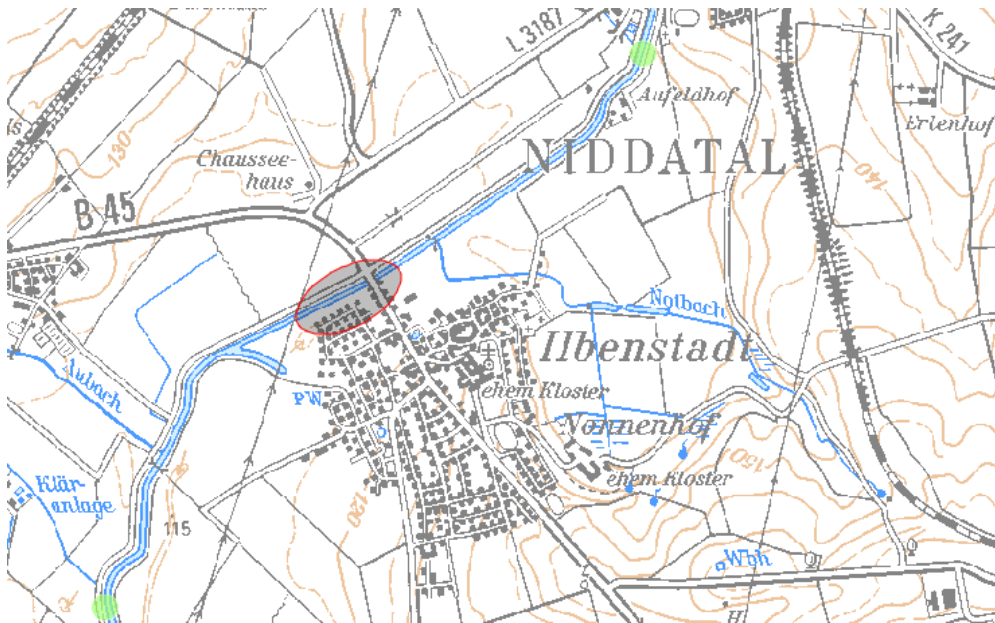


Abbildung 20: Standortvorschlag bei Ilbenstadt, Karte: (Weinberger 2017)

Bad Vilbel (Nidda)

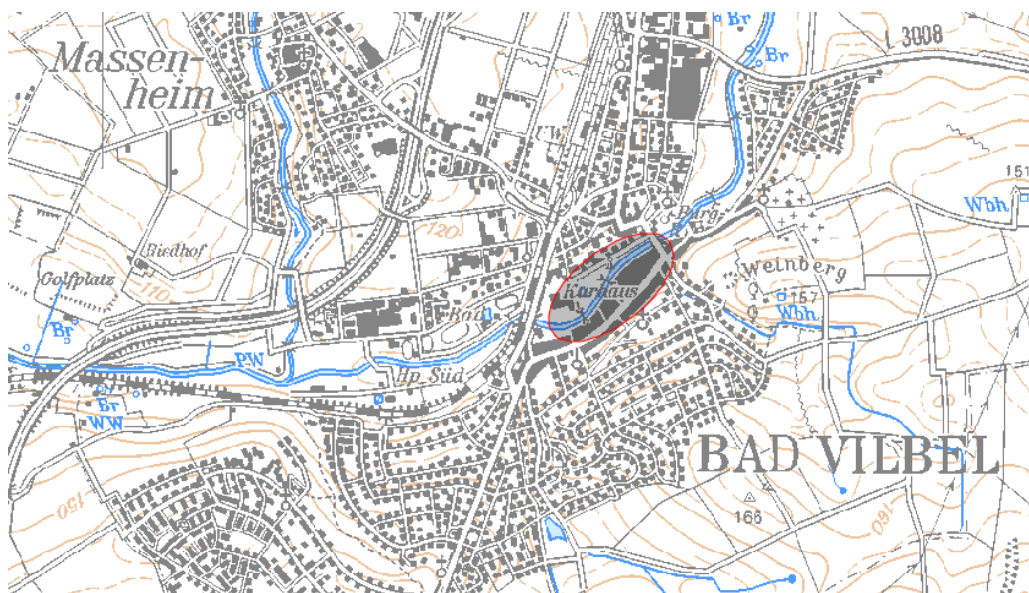


Abbildung 21: Standortvorschlag bei Bad Vilbel, Karte: (Weinberger 2017)

Bad Vilbel – als Ort, der an der Nidda liegt und das höchste Potenzial im Bereich mit ausreichender Wassertiefe aufweist – besitzt vor allem im markierten Bereich einen möglichen Standort. Direkt in Ufernähe befinden sich Gebäude – unter anderem große Gebäude mit vielen Geschäften; hier wäre eine gemeinsame Nutzung der Energie denk-

bar. Im ausgewählten Bereich befindet sich außerdem die Stadtbibliothek von Bad Vilbel („Mediathek“). Sie ist konstruiert als Fußgängerbrücke, die über den Fluss verläuft. Auch für die Mediathek ist eine Wärmeenergetische Nutzung möglich und gerade im Sinne der Effizienz durch Transportwegverkürzung denkbar. Zudem heißt es hier, dass eine Abkühlung des Fließgewässers positiv wäre, da in diesem Bereich – teilweise durch fehlende Bäume – die Aufheizung des Fließgewässers bemerkbar ist (Krohn et al. 2008).



Abbildung 22: Mediathek der Stadt Bad Vilbel (Jehner)

Hanau (Kinzig)

Da das Fließgewässer mitten durch den Stadtteil fließt und hier viele Gebäude in Ufernähe positioniert sind, ist der Einsatz des Wärmetauschers in diesem Bereich prinzipiell überall möglich – es gibt keinen speziellen Standort, der im Vergleich wesentlich günstiger als die umliegenden wäre.

Gelnhausen (Kinzig)

Gelnhausen – als der Ort, der durchweg die größte Leistungsfähigkeit im Vergleich zu den betrachteten Alternativen besitzt - lässt mehrere Standortvorschläge zu (siehe Abbildung 23). Einerseits (Vorschlag 1 in der Abbildung) ist hier ein Mühlkanal vorhanden, dessen Nutzungsmöglichkeit zu überprüfen ist. Vorschlag 2 – sollte die Nutzung des Mühlkanals nicht möglich sein - bezieht sich auf den Abschnitt hinter dem Mühlkanal, da hier eine Durchmischung gegebenenfalls durch den kurvigen Flusslauf schneller vonstattengeht als an einem geraden Abschnitt. Der Einsatz des Wärmetauschers hinter der Einmündung eines Zuflusses ist der 3. Vorschlag. Durch den Zufluss entstehen zusätzliche Turbulenzen, die bei der Durchmischung helfen können. Vorteil an einem Standort in Gelnhausen ist auch hier, dass sich im flussaufwärts gelegenen Nachbarort Biebergemünd eine Kläranlage befindet, sodass der Entzug der eingeleiteten Wärme möglicherweise wiederholt gern von der Unteren Wasserbehörde genehmigt wird.

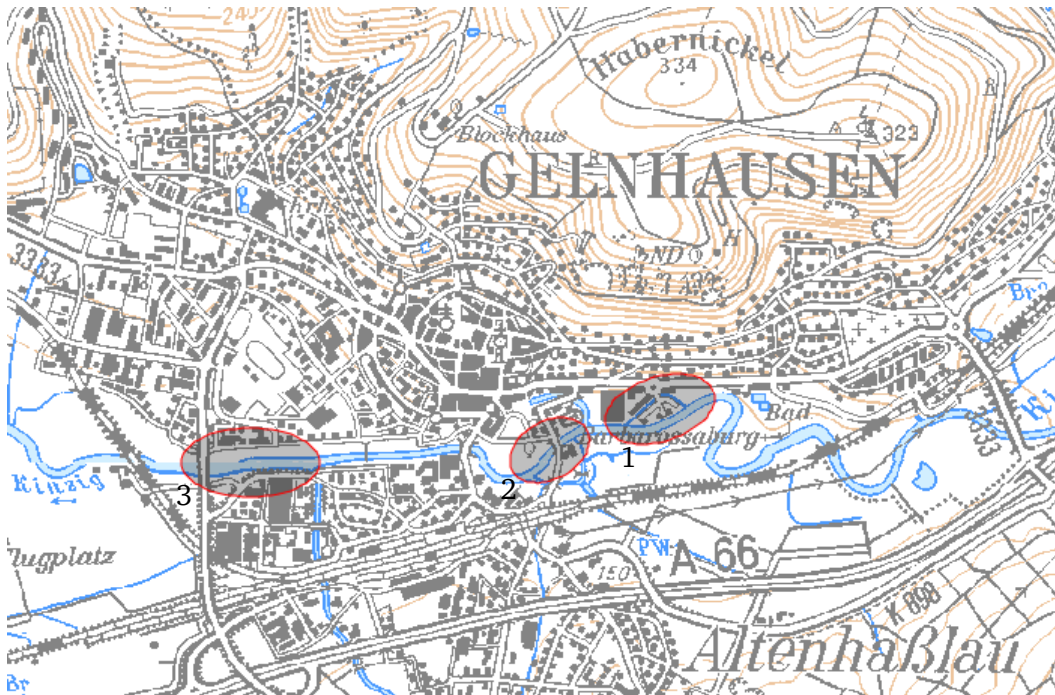


Abbildung 23: Standortvorschlag bei Gelnhausen Karte: (Weinberger 2017)

Die Plausibilität der Rechenwerte vorausgesetzt, kann Gelnhausen als favorisierter Ort für den Einsatz eines Wärmetauschers gesehen werden. Neben der Tatsache, dass hier das Fließgewässer sowohl für den Heizfall im Winter (durchaus wichtigster Fall) als auch in der Gesamtbilanz der Fälle die besten Werte aufweist, bietet Gelnhausen auch verschiedene Standortmöglichkeiten für den Wärmetauscher. Um hier auch die weiteren Anforderungen zu betrachten: Das Gebiet am gesamten Flusslauf der Kinzig gilt als FFH-Gebiet, demnach sind potenzielle Auflagen zu prüfen. Die Gewässergüte ist an den verschiedenen Standortmöglichkeiten größtenteils gut, teilweise mäßig, sodass die Bewuchsprobleme an diesen Stellen wahrscheinlich eher gering ausfallen würden.

10 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine kurze Motivation der Arbeit gegeben, tiefgehende Grundlagen für die Berechnungen der Wärmeenergetischen Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung naturschutzrechtlicher und weiterer Anforderungen gelegt sowie die Wahl mehrerer Standorte - mit Favorisierung eines Standortes – auch unter Einhaltung ökonomisch-funktionaler Aspekte getroffen.

Es kann festgehalten werden, dass sowohl für die Nidda Bad Vilbel und Ilbenstadt als auch für die Kinzig Hanau und Gelnhausen für mögliche Standorte des Wärmetauschers geeignet sind. Um zu überprüfen, ob gewählte Annahmen – vor allem für die Kinzig – realitätsnah sind, sollten stichprobenartige Untersuchungen durchgeführt werden. Hierfür müssen keine Querprofile ausgemessen werden: Es ist die Fließgeschwindigkeit, die ausschlaggebend für den Durchfluss im Wärmetauscher ist, und durch die mit bekanntem Durchfluss auch der Querschnitt berechnet werden kann. Werden Standorte über die hier beschriebene Wahl hinaus in Betracht gezogen, zu denen es keine konkreten Daten gibt, so sollten durch unabhängige Messungen auch hier die angenommenen Werte stichprobenartig auf Realitätsnähe geprüft werden. Weiterhin ist am Mühlkanal in Gelnhausen zu überprüfen, inwieweit bessere oder schlechtere Bedingungen als im daneben fließenden natürlichen Gewässerabschnitt vorliegen. Prinzipiell bessere Chancen sind gegeben, wenn weder eine Mühle noch ein Wasserkraftwerk betrieben wird, sodass die Wasserbedingungen allein für den Wärmetauscher genutzt werden können. Zudem wäre in diesem Fall eine behördliche Genehmigung sicherlich wahrscheinlicher als bei schon bestehenden Belastungen für die Lebewesen.

Derzeit liegen noch nicht viele Erfahrungswerte für die Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern vor. Daher ist eine Abschätzung des Nutzens nur schwer vorzusehen. Prinzipiell lassen die hohe Wärmespeicherkapazität von Wasser sowie der Umstand, dass viele Städte an Fließgewässern erbaut sind, also schon hohe Nutzerpotenziale vorhanden sind, den Schluss zu, dass eine Nutzung der vorhandenen Ressourcen positiv ist. Über die Nutzung der natürlichen Fließgewässer hinaus ist auch der Einsatz bei Kraftwerken denkbar. Oftmals gehen Probleme damit einher, dass die Kühlmittel zu warm werden, um sie direkt in Fließgewässer einzuleiten. Die Nutzung dieser Wärme kann aus vielerlei Sicht sinnvoll sein. Zum einen wäre die Problematik nicht mehr so stark, wenn die Kühlmittel aufgrund von Wärmeentzug durch einen Wärmetauscher nicht

mehr zu warm für die Fließgewässereinleitung wären – hier könnten gegebenenfalls sogar Kühltürme reduziert werden. Weiterhin könnten womöglich Fließgewässer entlastet werden dadurch, dass die Einleitungstemperaturen gesenkt würden. Und schließlich könnten natürliche Ressourcen geschont werden, womit einhergeht, dass auch die Umwelt durch den Einsatz umweltfreundlicher Energie geschont werden könnte.

Auch allgemein ist der Trend zu beobachten, dass die Gewässertemperaturen durch den Klimawandel ansteigen. Seit 1980 wird in Bayern im Rahmen des Vorhabens KLIWA über etwa 50 Temperaturmessstellen hinweg ein durchschnittlicher Temperaturanstieg von 0,5 K pro Jahrzehnt beobachtet (Otto). Wie in vorliegender Arbeit erläutert, reagiert die Fließgewässerökologie besonders empfindlich auf Temperaturerhöhungen; um (Glatzel und Heise 1980) zu zitieren: „Bei höherer Temperatur hat sich alles gegen das Wasser verschworen“. Durch den Wärmeentzug aus Fließgewässern für eine wärmeenergetische Nutzung kann die Wärmepumpe zumindest einen Teil dazu beitragen, die Gewässertemperaturerhöhungen zu minimieren. Das ist umweltschutztechnisch ein Schritt in die richtige Richtung.

11 Anhang

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Überblick über die Lebewesen im Fließgewässer	68
Anlage 2: Erläuterung der Wärmeeinleitungsarten (konstruktive Form)	69
Anlage 3: Formeln zu Massen- und Impulserhaltung (DWA 2016).....	70
Anlage 4: Darstellung unterschiedlicher Verläufe des Auftriebsstrahls	70
Anlage 5: Ansatz zur Berechnung der Durchmischungslänge	71
Anlage 6: Erläuterung der Temperaturbereiche für Fische	72
Anlage 7: Gewässergüte - Der ökologische Zustand der Oberflächengewässer	72
Anlage 8: Kläranlagen und Mühlgräben entlang der Fließgewässer	73
Anlage 9: Anforderungen an Wärmequellen (Baumann et al.)	74
Anlage 10: Anforderungen an den sehr guten ökologischen Zustand für Fließgewässer (OGewV Anlage 7)	75
Anlage 11: Anforderungen an den guten ökologischen Zustand für Fließgewässer (OGewV Anlage 7)	76
Anlage 12: Vergleich der Regressionskurven für die Querschnitte.....	77
Anlage 13: Kühlfall Sommer (Nidda).....	78
Anlage 14: Kühlfall Sommer (Wetter)	78
Anlage 15: Kühlfall Sommer (Kinzig)	79
Anlage 16: Heizfall Sommer (Nidda).....	79
Anlage 17: Heizfall Sommer (Wetter).....	80
Anlage 18: Heizfall Sommer (Kinzig)	80
Anlage 19: Heizfall Winter (Nidda)	81
Anlage 20: Heizfall Winter (Wetter)	81
Anlage 21: Heizfall Winter (Kinzig).....	82
Anlage 22: Vorstellung des Projektbeispiels an der Wetter.....	83

Anlage 1: Überblick über die Lebewesen im Fließgewässer

Artenvielfalt im Fließgewässer

Es erfolgt ein kurzer Anriss über die verschiedenen Lebensformen.

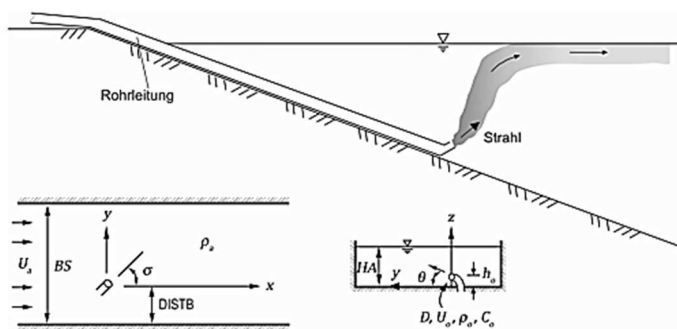
In Seen vermehrt zu finden, gibt es auch in Fließgewässern Plankton. Arteigenes Potamoplankton gibt es nicht, auch Zooplankton tritt in Fließgewässern individueller als in Seen auf. Dennoch wird Plankton in Fließgewässer eingeschwemmt und beeinflusst somit auch Teile des ökologischen Ganzen.

Viele Organismen leben am Boden des Fließgewässers, an den Untergrund oder ein anderes Substrat gebunden, sodass sie sich festklammern können und nicht durch die Strömung abdriften. In Bergbächen beispielsweise suchen sich die Flusswassertiere strömungsgeschützte Areale, das sogenannte „Totwasser“, in Geröll, im Pflanzenpolster oder zwischen Lockergesteinen unter der Stromsohle. Algen beispielsweise besiedeln die Oberseite von Steinen oder anderem Geröll, bevorzugt deren Luv- oder Leeseite, die strömungsgeschützt sind als am Kopf des Steins. Rot-, Blau-, und Grünalgen bilden hier ihre flachen, epilithischen Lager. Wassermoose und submerse Blütenpflanzen bilden im Fließgewässer einen Großteil der Vegetation und bilden vor allem auf der Stromsohle ausgedehnte Bestände.

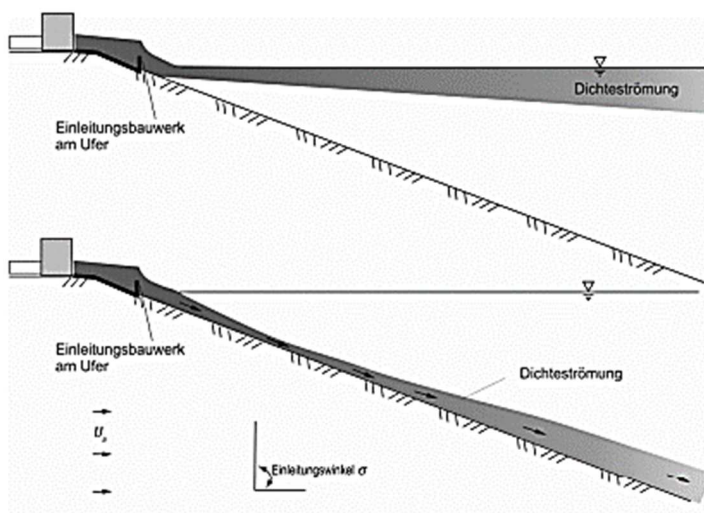
Submerse Makrophyten, die in Fließgewässern leben, unterstützen auch andere Tiere in der Niederlassung. Ihre Habitate sind geprägt von verminderter Wasserbewegung, der Akkumulation von Schwebstoffen und räumlich wechselnden Sauerstoffverhältnissen und bieten somit auch Unterschlupf für andere Lebewesen. Wo sich die Tiere der Fließgewässer an der Stromsohle sonst aufhalten, ist abhängig von der Korngrößenverteilung den Sedimenten selbst, beides beeinflusst von den Stauhaltungen in den Flüssen und chemischen oder biogeographischen Gegebenheiten.

Eine Auswahl der wichtigsten Tiere der Fließgewässer sind Turbellarien, Amphipoden, Wassermilben, Insekten und Käfer. Und auch die Fische sollen nicht fehlen: charakteristische Fische der Fließgewässer Europas sind die Salmoniden - der Lachs, die Bachforelle, der Bachsaibling und die Äsche - und einige Cypriniden sowie kleinere Bodenfische. Dabei bevorzugen diese Fische bestimmte Gewässerabschnitte je nach Laichgewohnheiten und Vorzugstemperaturen (Schwoerbel und Brendelberger 2013).

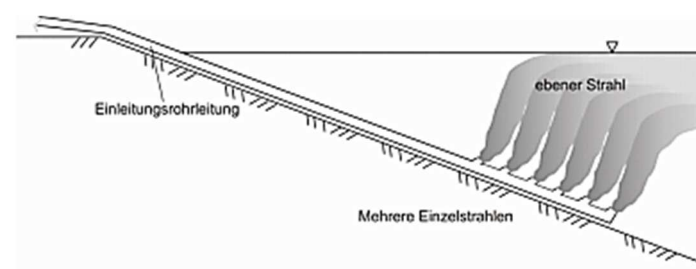
Anlage 2: Erläuterung der Wärmeeinleitungsarten (konstruktive Form)

Die Einzelstrahleinleitung

Die Einzelstrahleinleitung stellt den Basisfall einer Einleitung dar. Aus der Austrittsöffnung tritt ein Strahl aus, der abhängig von der Dichte an die Wasseroberfläche steigt oder auf die Sohle sinkt.

Die Freispiegeleinleitung

Die Freispiegeleinleitung ist ein Sonderfall der Einzelstrahleinleitung, die unter dem Randeinfluss der freien Oberfläche steht. Hier besteht von Anfang an Kontakt zur Wasseroberfläche oder der Sohle.

Die Diffusoreinleitung

Die Diffusoreinleitung stellt eine optimierte Form der Einleitung dar, da sie durch das Diffusorrohr eine große Anfangsverteilung bzw. -durchmischung der eingeleiteten Wärme erreicht.

(DWA 2016)

Anlage 3: Formeln zu Massen- und Impulserhaltung (DWA 2016)

- Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung)**

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v}) = \frac{\delta \rho}{\delta t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta(\rho \vec{v})}{\delta \vec{X}} = 0 \quad (\text{A1})$$

\vec{v} : Geschwindigkeitsvektor $(u,v,w)^T$ [m/s] ρ : Dichte [kg/m³]
 $\vec{\nabla}$: Nabla-Operator t : Zeit [s]
 \vec{X} : Ortsvektor $(u,v,w)^T$ [m]

- Impulsgleichung (Impulserhaltung)**

$$\frac{\delta(\rho \vec{v})}{\delta t} + \vec{v} \vec{\nabla}(\rho \vec{v}) + \rho 2 \vec{\Omega} \vec{v} = -\vec{\nabla} p - \rho g + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F}_e \quad (\text{A2})$$

$\vec{\Omega}$: Erdrotationsvektor [1/s]
 p : Druck [Pa]
 g : Erdbeschleunigung [m/s²]

μ : dynamische Viskosität [kg/(ms)]
 \vec{F}_e : externe Kräfte [N]

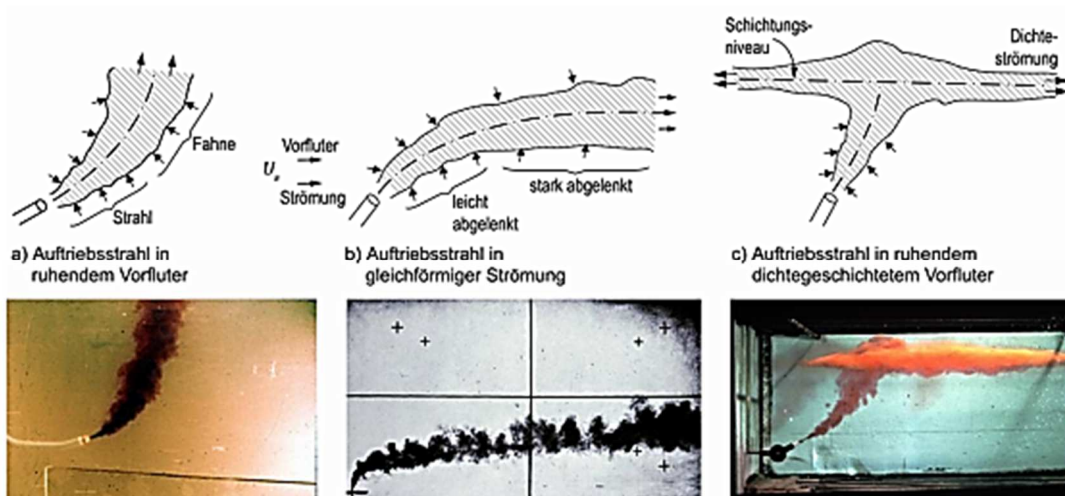
Linke Seite der Gleichung:

- 1) aus lokaler Beschleunigung
- 2) aus advektiver Beschleunigung
- 3) aus Coriolis-Beschleunigung

Rechte Seite der Gleichung:

- 1) Druckkraft
- 2) Gewichtskraft (hydrostatisch)
- 3) viskose Spannungskraft
- 4) externe Kräfte

Anlage 4: Darstellung unterschiedlicher Verläufe des Auftriebsstrahls



Anlage 5: Ansatz zur Berechnung der Durchmischungslänge

Vertikale Durchmischung nach (DWA 2016)

Die Gleichung zur Beschreibung der vertikalen Durchmischung mit Advektion und Diffusion lässt sich aus der Transportgleichung ableiten:

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta x} + v \frac{\delta C}{\delta y} + w \frac{\delta C}{\delta z} = e_x \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} + e_y \frac{\delta^2 C}{\delta y^2} + e_z \frac{\delta^2 C}{\delta z^2} \quad (\text{A3})$$

C: Konzentration [kg/m³]

t: Zeit [s]

u,v,w: Geschwindigkeitskomponenten [m/s]

e_x, e_y, e_z : Diffusionskoeffizienten (in

Fließrichtung, horizontal quer zur

Fließrichtung, vertikal) [m²/s]

Ein unendlich breites Rechteckgerinne sowie lineare turbulente Schubspannungsverteilung über die Fließtiefe angenommen, liefert dann folgendes vertikales Geschwindigkeitsprofil

$$v_x(z) = v_m + \frac{v'}{\kappa} \left(1 + \frac{z}{h_{Fl}}\right) \quad (\text{A4})$$

x: Koordinate in Fließrichtung [m]

z: vertikale Koordinate (nach oben positiv) [m]

h_{Fl} : (mittlere) Fließtiefe [m]

v_m : mittlere Fließgeschwindigkeit in x-

Richtung [m/s]

κ : Karman'sche Konstante [-]

Aus diversen Umformungen (siehe DWA 2016) resultiert das Konzentrationsprofil:

$$\frac{C}{C_\infty} = \frac{1}{\sqrt{4\pi x'}} \Sigma \left[e^{-(z'-2n-z'_0)^2/(4x')} + e^{-(z'-2n+z'_0)^2/(4x')} \right] \quad (\text{A5})$$

Mit $x' = \frac{x e_z}{u_x h_{Fl}^2}$, $z' = \frac{z}{h_{Fl}}$ und $z'_0 = \frac{z_0}{h_{Fl}}$, wobei z_0 : Höhe der Einleitung über der Sohle

Hieraus ergibt sich eine fast vollständige Durchmischung (95%ige Durchmischung,

Einleitung in halber Fließtiefe) nach $L_z = 0,094 \frac{u_x h_{Fl}^2}{e_z} \approx 35 h_{Fl}$

Laterale Durchmischung nach (DWA 2016)

Unter der Annahme $e_y = 2e_z$ ist die Ableitung der Durchmischungslänge analog und es ergibt sich eine Länge von $L_y = 0,134 \frac{u_x B^2}{e_y} \approx 70 \frac{B^2}{h_{Fl}}$ (95%ige Durchmischung, Einleitung am Ufer)

Anlage 6: Erläuterung der Temperaturbereiche für Fische

Temperaturbereich	Auffälligkeiten des Fisches
Lethargische Temperatur	Keine Nahrungsaufnahme, keine Aktivität
Fremdtemperatur	Reduzierte Nahrungsaufnahme, reduzierte Aktivität
Vorzugstemperatur	Dem Fisch entsprechendes Verhalten
Unruhetemperatur	Unruhe, Einstellung der Nahrungsaufnahme
Ausweichtemperatur	Meiden der Temperatur durch Ausweichen
Tödliche Temperatur / Letaltemperatur	Sterben von mindestens der Hälfte der Fische; irreversible Schädigungen

Anlage 7: Gewässergüte - Der ökologische Zustand der Oberflächengewässer

Der ökologische Zustand der Oberflächengewässer

Der ökologische Zustand eines Oberflächengewässers soll nach EG-Wasserrahmenrichtlinie bewertet werden. Er hängt vordergründig von der biologischen Gewässergüte ab, allerdings fallen auch physikalisch-chemische und hydromorphologische Faktoren ins Gewicht. Der Grundgedanke ist hier, dass nur unter umweltgerechter Gewässerstruktur und günstigen stofflichen Gegebenheiten ein guter Lebensraum für Flora und Fauna gegeben sein kann. Daher kann ein Flussabschnitt auch lediglich mit „mäßig“ bewertet werden, sobald die Umweltqualitätsnorm eines flussgebietsspezifischen Schadstoffs überschritten wird. Insgesamt wird der ökologische Zustand durch fünf Klassen geschrieben:

- Klasse 1: sehr gut
- Klasse 2: gut
- Klasse 3: mäßig
- Klasse 4: unbefriedigend
- Klasse 5: schlecht

Klasse 1 beschreibt dabei den Gewässerzustand ohne anthropogene Einflüsse und Belastungen (Referenzzustand). Da sich die Artenvielfalt der Flora und Fauna je nach Lebensbedingungen verändert, können mit ihrer Hilfe der Referenzzustand und alle

Zustände darüber hinaus ermittelt werden. Da dennoch verschiedene Qualitätskomponenten zur Ermittlung des ökologischen Zustands herangezogen werden, wurde festgelegt, dass der Zustand von schlechtesten Einzelergebnis bestimmt wird („Worst-Case-Prinzip“) (Völker und Mohaupt 2016).

Anlage 8: Kläranlagen und Mühlgräben entlang der Fließgewässer

Kläranlagen, bei denen mit Wassereinleitungen zu rechnen ist, und Mühlgräben

Nidda

- Kläranlagen:
Kläranlage hinter Nidda, in Dauernheim, hinter Unter-Florstadt, hinter Ilbenstadt, Karben, (Nieder-Dorfelden, Zufluss über Nidder)
- Mühlgräben:
vor Nidda, in Staden, in Rödelheim (Solmspark), vor Gronau

Wetter

- Kläranlagen:
Ober-Bessingen (oder Bessingen), bei Lich, bei Lich/Muschenheim, in Butzbach, hinter Rödgen, in Friedberg
- Mühlgräben:
hinter Nieder-Bessingen, hinter Lich, beim Kloster Arnsburg, hinter Lich/Muschenheim, kurz vor Trais-Münzenberg, in Münzenberg, hinter Münzenberg, zwischen Gambach und Griedel, am Anfang von Griedel, am Ende von Griedel, vor der „Breitwiese“ vor Steinfurth, in Steinfurth, in Görbelheim

Kinzig

- Kläranlagen:
bei Steinau, in Niederzell, bei Hausen (Bad Soden-Salmünster), bei Mündung der Orb in die Kinzig, bei Meerholz, bei Gründau, am Kinzigsee (über Gründau), am Erlensee
- Mühlgräben:
bei Herolz (Schlüchtern), vor Niederzell (Schlüchtern) bei Ahl (Bad Soden-Salmünster), hinter Kinzig-Stausee (bei Bad Soden), bei Linsengericht

(Weinberger 2017)

Anlage 9: Anforderungen an Wärmequellen (Baumann et al.)

	Erdreich		Grundwas- ser	Oberflächenwas- ser	Außen- luft	Sonne
Eigenschaften	Horizon- tal indirekt	Vertikal indirekt		Fließgewässer		„Energie- dach“
Spez. Entzugs- leistung	15-40 W/m ²	30-100 W/m	2 m ³ /h für 10kW		1 m ³ /s für 10 kW	0-500 W/m ²
Temperatur der beeinfluss- ten Wärme- quelle [°C]	-5 bis +15	-2 bis +10	+8 bis +15	-2 bis +15	-25 bis +15	-20 bis +40
Zeitgang von Wärmebedarf und -angebot	wenig kohärent	noch kohä- rent	noch kohä- rent	wenig kohärent	inkohä- rent	inkohärent
Örtliche Ver- fügbarkeit	nahezu überall	nahezu überall	nahezu überall	lageabhängig	überall	überall
Indirekte Küh- lung	ja	ja	ja	ja	nein	nein

Anlage 10: Anforderungen an den sehr guten ökologischen Zustand für Fließgewässer
(OGewV Anlage 7)

Fischgemeinschaft							
Anforderungen	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	Cyp-R	EP	MP	HP
T_{\max} [°C] Sommer (April bis November)	<18	<18	<18	<20	<20	<25	<25
Temperaturerhöhung Sommer [ΔT in K]	0	0	0	0	0	0	0
T_{\max} [°C] Winter (De- zember bis März)	≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Temperaturerhöhung Winter [ΔT in K]	≤ 1	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3

Die Werte für die Temperaturerhöhung bezeichnen die maximal zulässige Differenz zwischen den Temperaturen oberhalb und unterhalb einer Einleitungsstelle für Abwärme.

Legende:

Sa-ER: salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals

Sa-MR: salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals

Sa-HR: salmonidengeprägte Gewässer des Hyporhithrals

Cyp-R: cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals

EP: Gewässer des Epirhithrals

MP: Gewässer des Epirhithrals

HP: Gewässer des Epirhithrals

Anlage 11: Anforderungen an den guten ökologischen Zustand für Fließgewässer
(OGewV Anlage 7)

Fischgemeinschaft							
Anforderungen	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	Cyp-R	EP	MP	HP
T_{\max} [°C] Sommer (April bis November)	<20	<20	<21,5	<23	<25	<28	<28
Temperaturerhöhung Sommer [ΔT in K]	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3
T_{\max} [°C] Winter (De- zember bis März)	≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Temperaturerhöhung Winter [ΔT in K]	≤ 1	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3

Die Werte für die Temperaturerhöhung bezeichnen die maximal zulässige Differenz zwischen den Temperaturen oberhalb und unterhalb einer Einleitungsstelle für Abwärme.

Legende:

Sa-ER: salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals

Sa-MR: salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals

Sa-HR: salmonidengeprägte Gewässer des Hyporhithrals

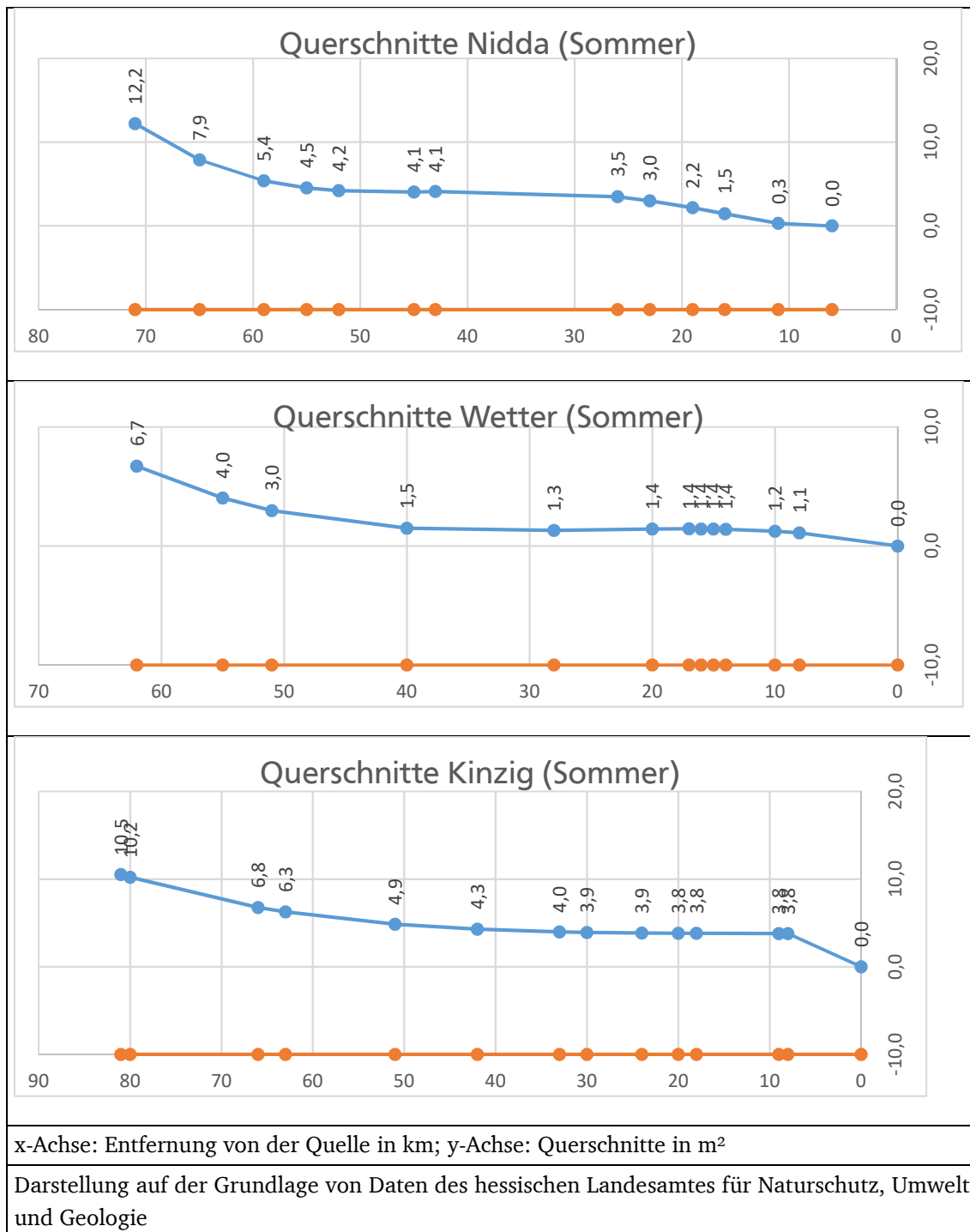
Cyp-R: cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals

EP: Gewässer des Epirhithrals

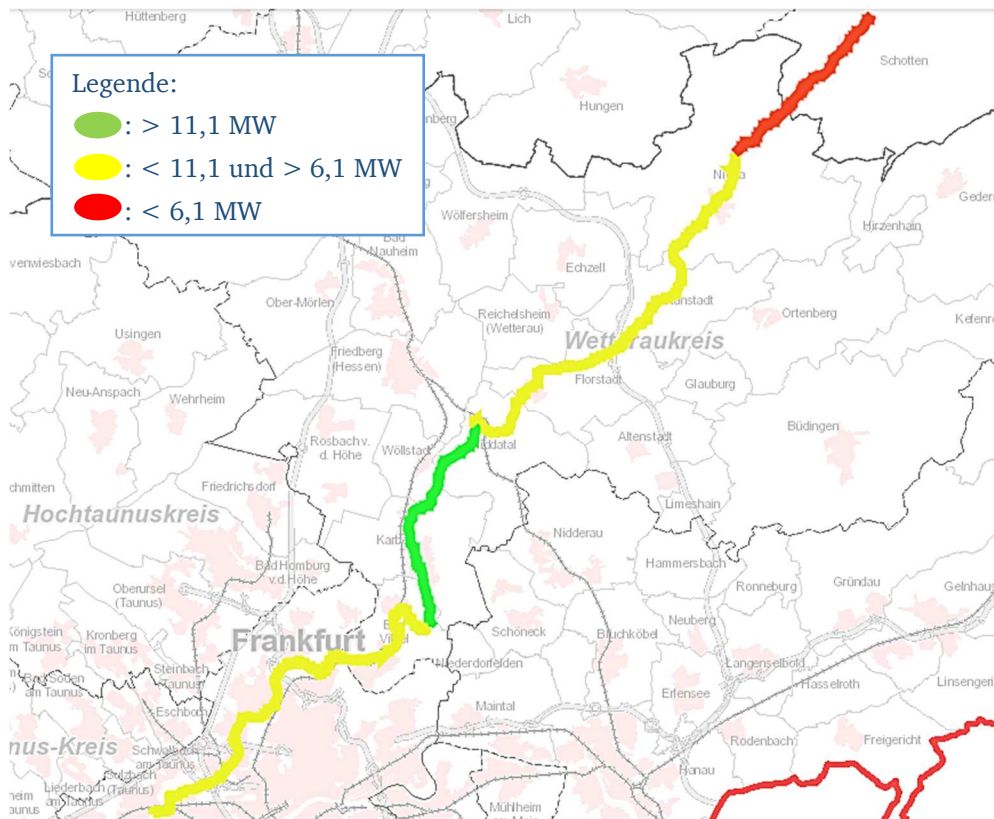
MP: Gewässer des Epirhithrals

HP: Gewässer des Epirhithrals

Anlage 12: Vergleich der Regressionskurven für die Querschnitte

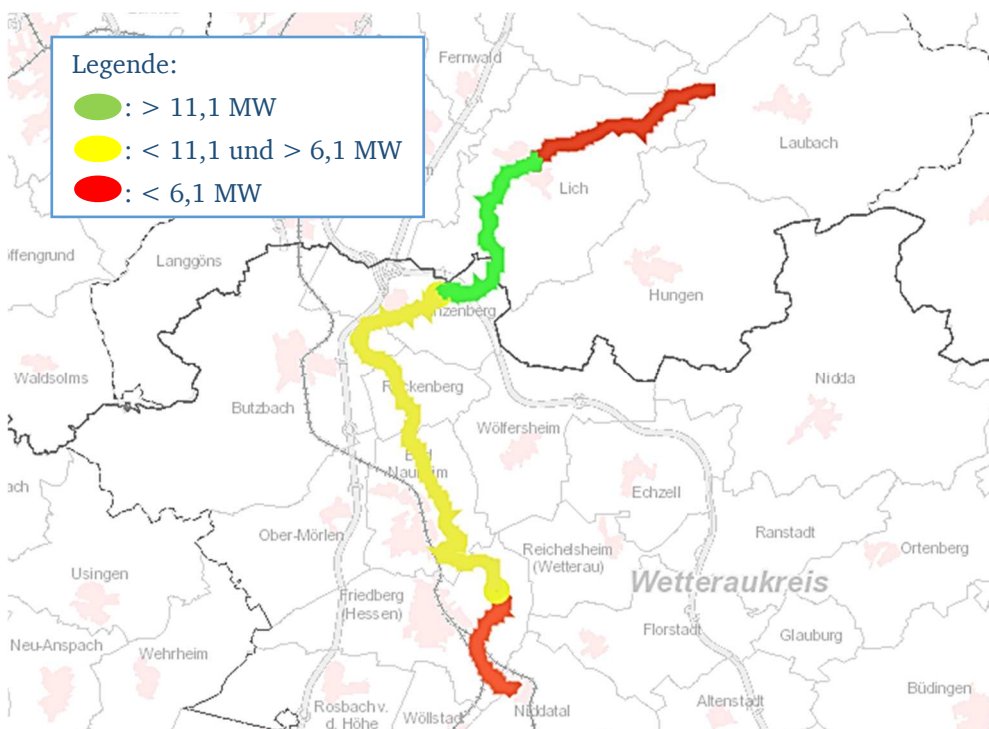


Anlage 13: Kühlfall Sommer (Nidda)



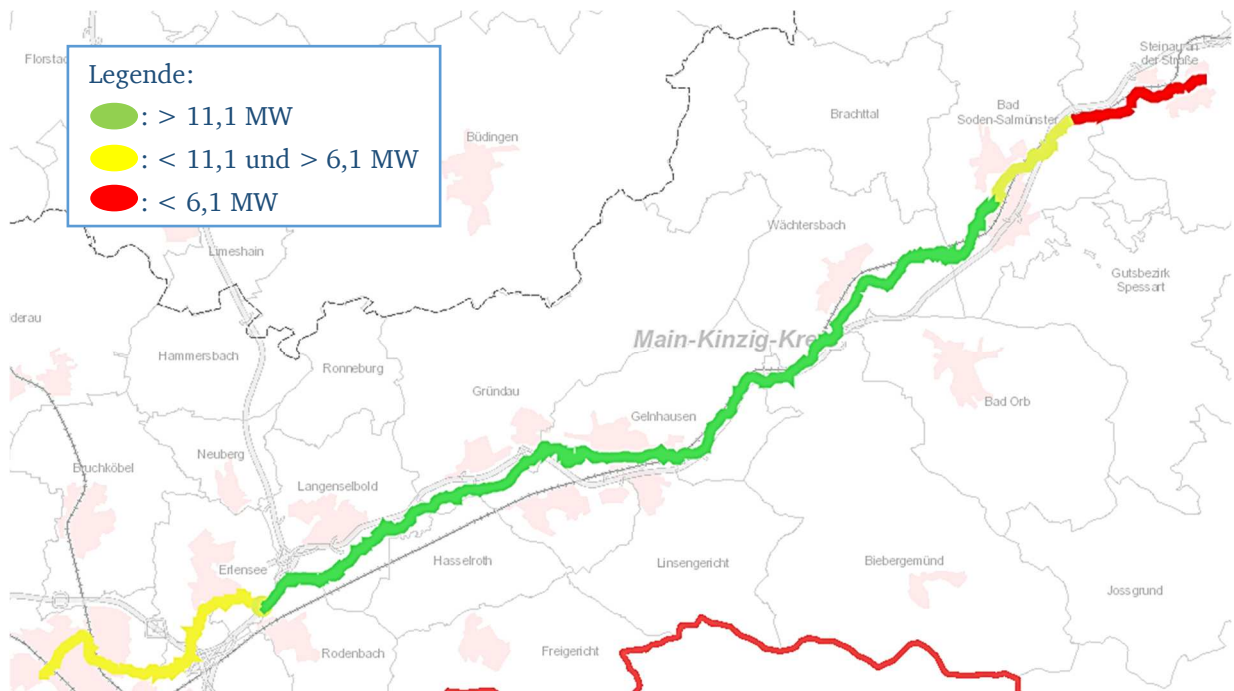
Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 14: Kühlfall Sommer (Wetter)



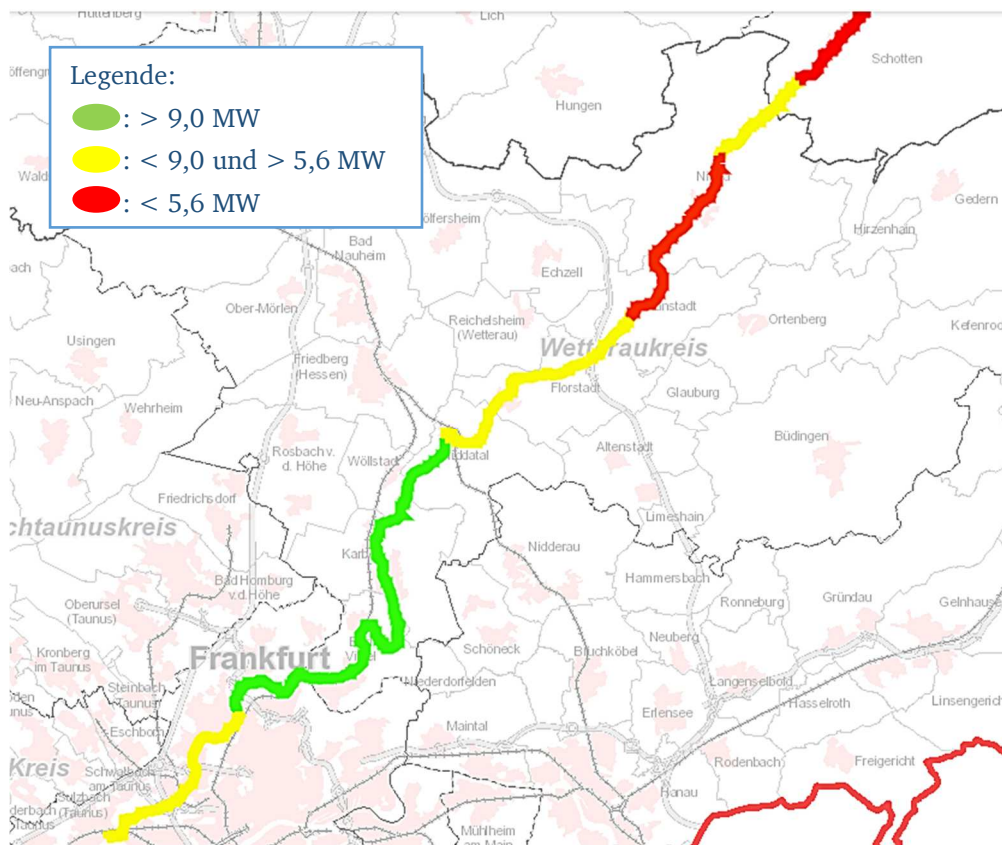
Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 15: Kühlfall Sommer (Kinzig)



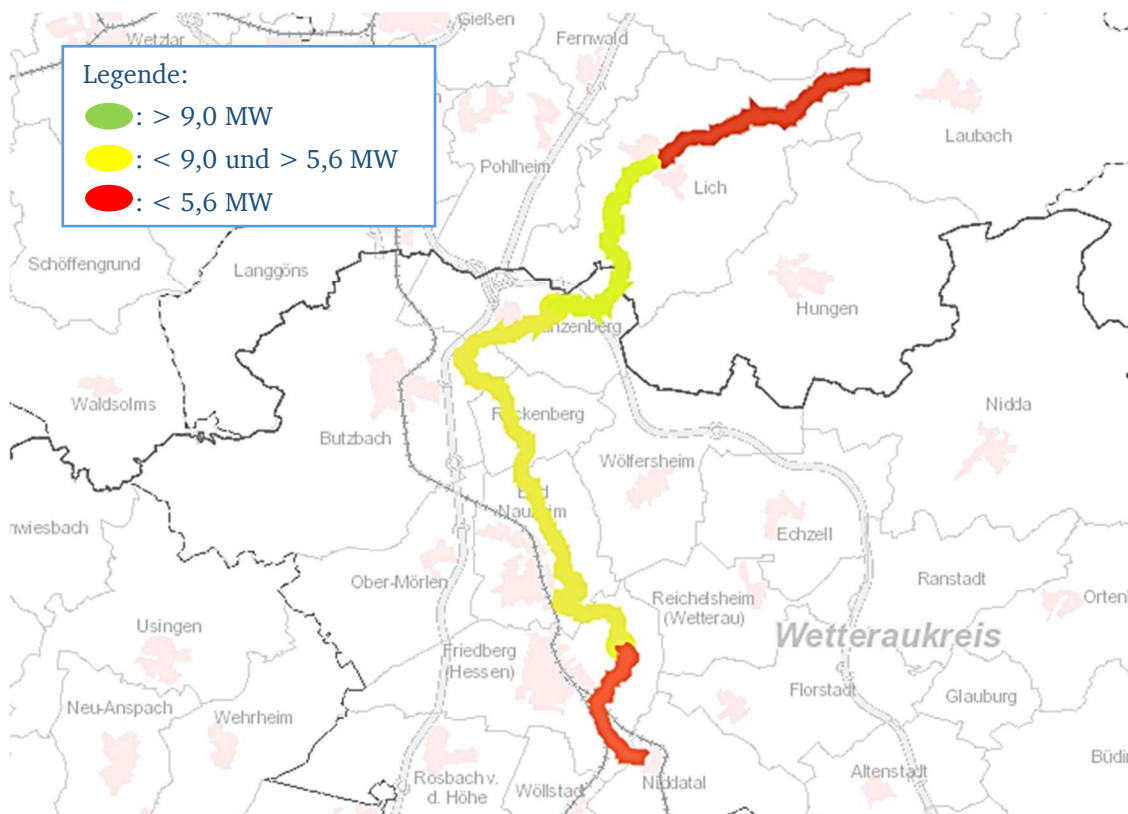
Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 16: Heizfall Sommer (Nidda)



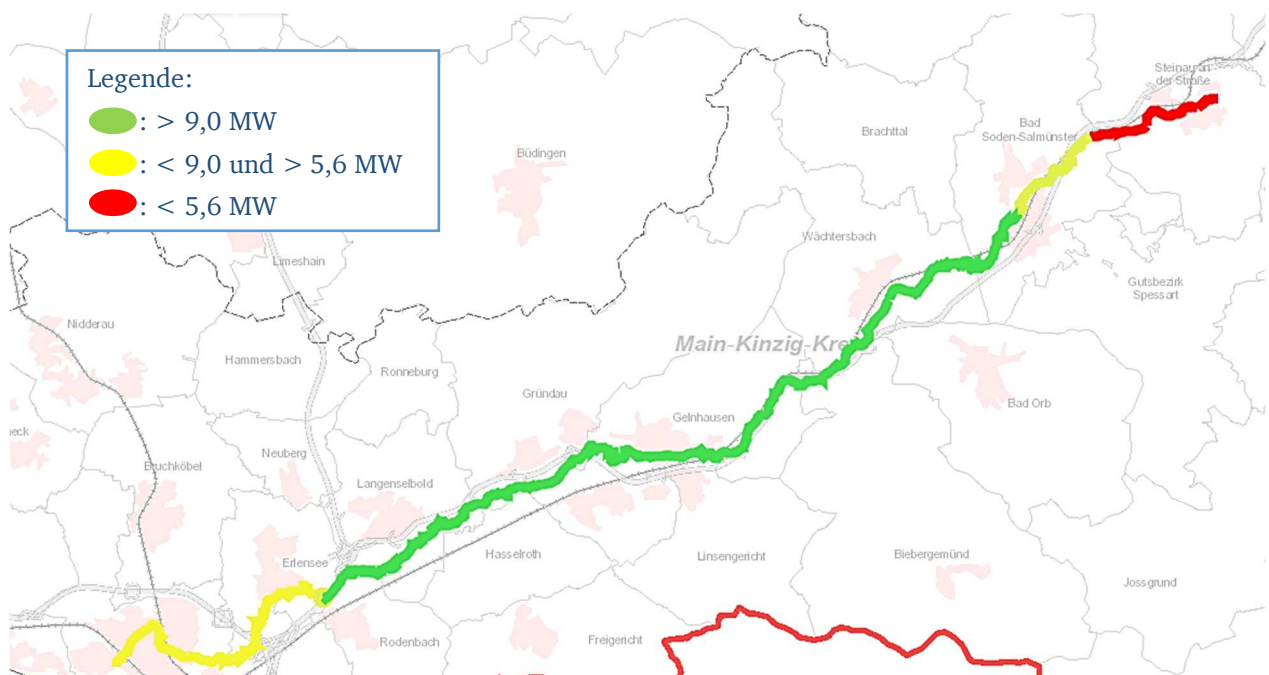
Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 17: Heizfall Sommer (Wetter)



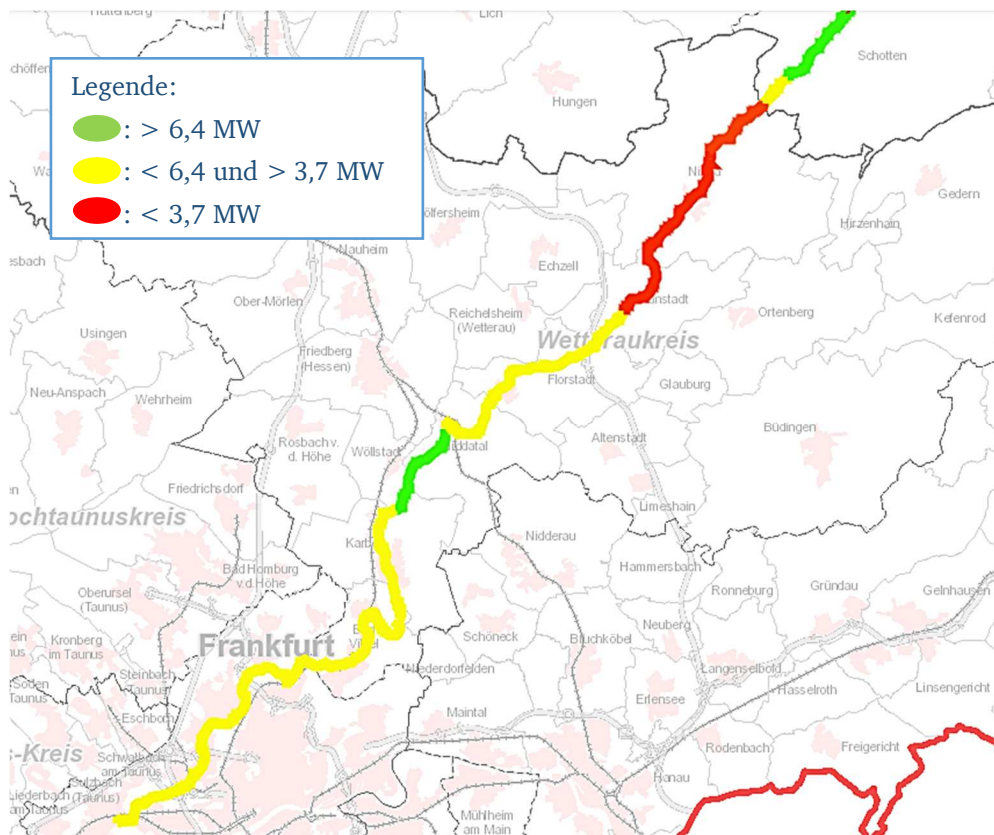
Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 18: Heizfall Sommer (Kinzig)



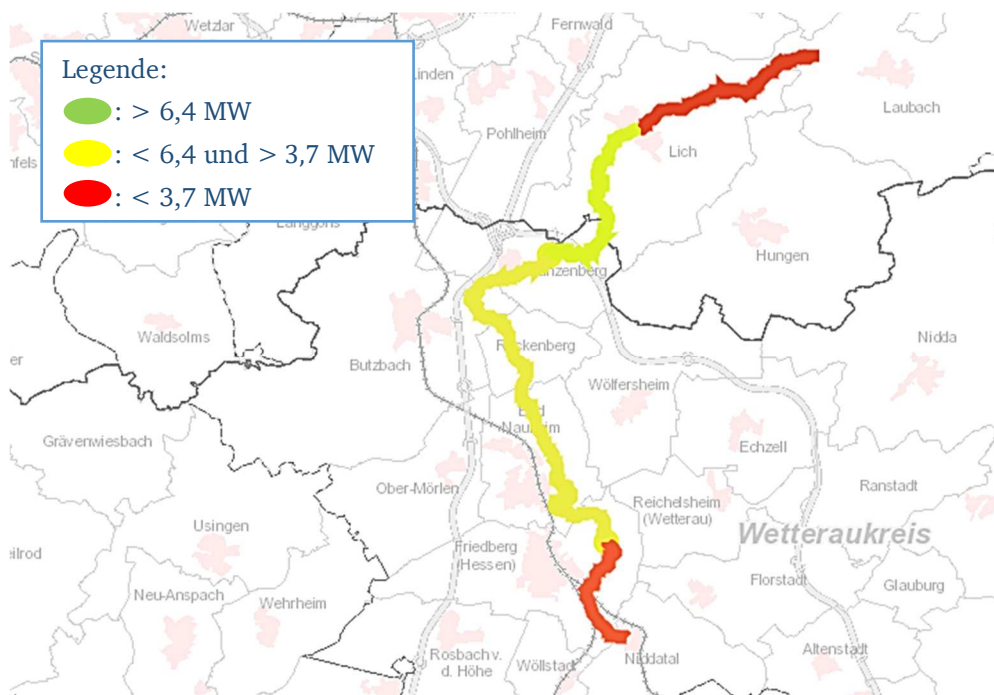
Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 19: Heizfall Winter (Nidda)



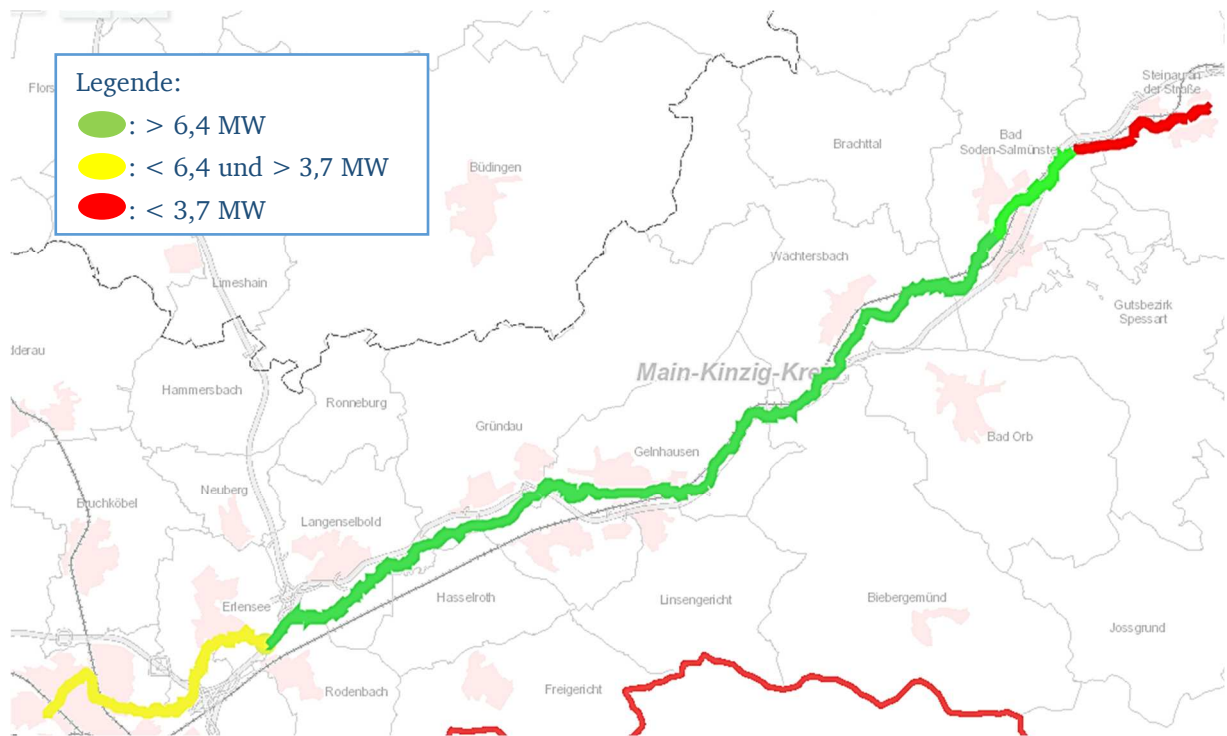
Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 20: Heizfall Winter (Wetter)



Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 21: Heizfall Winter (Kinzig)



Darstellung auf der Grundlage von Daten des hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Anlage 22: Vorstellung des Projektbeispiels an der Wetter

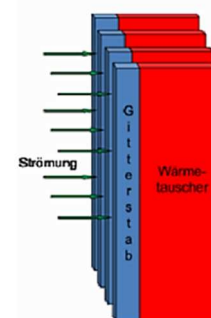
Projektbeispiel an der Wetter

An der Görbelheimer Mühle (Nähe Friedberg, Gemarkung Bruchenbrücken) wird eine Wärmepumpe durch die Privatperson Rudolf Schemer betrieben. Zwei Wohnungen in der Mühlenscheune werden – mit Unterstützung durch Solarstrom – durch die Wärmepumpe mit Wärme versorgt. Die Heizleistung der Wärmepumpe beträgt dabei etwa 9 kW, die Gesamtfläche der Wohnungen beträgt 270 m².

Während des Planungsprozesses wurden zunächst die Möglichkeiten für eine Wärmepumpe diskutiert. Da die Geothermie-Nutzung in der Nähe des Fließgewässers behördlich nicht genehmigt wurde und Luftwärmepumpen sehr anfällig in Bezug auf Temperaturschwankungen sind, sollte eine Wärmepumpe mit Nutzung der Wärme aus dem Fließgewässer verwendet werden.

Die erste Variante, die in diesem Rahmen umgesetzt wurde, war die Verwendung eines offenen Systems: Flusswasser wurde aus der Wetter herausgepumpt und in den Wärmetauscher geleitet, der in der Mühlenscheune installiert war. Hier wurde eine Hochdruckpumpe verwendet, um Störungen aufgrund von Vereisungen zu verringern. Die Pumpe befand sich im Wasser nahe der Oberfläche in der Hoffnung, die Feinpartikelbelastung zu minimieren; ein Kiesfilter sollte die groben Verschmutzungen vermeiden. Dennoch war der Feinpartikeleintrag zu groß für die Pumpen, sodass die zweite und aktuelle Variante zum Tragen kam.

Die zweite Variante ist ein geschlossenes System, d.h. dass der Wärmetauscher direkt in das Fließgewässer eingesetzt wurde. Diese Variante wird als thermisch günstiger / effizienter und praktikabler gesehen. Trotz Bedenken auf der Planungsseite wurde diese Variante behördlich genehmigt. Der Wärmetauscher ist ein Plattenwärmetauscher (4-5 Platten mit einer Gesamtfläche von 10 m²), der sich in einem Metallkäfig befindet (Abschirmung von angeschwemmtem Material) und im Flussbett verankert ist.



Seit nun einem Jahr läuft die Wärmepumpenheizungsanlage ohne Probleme.

Die Wahl des Mühlgrabens als Standort des Wärmetauschers ist hier nicht beabsichtigt. Oftmals ist eine behördliche Genehmigung in Mühlgräben aufgrund der vorhandenen Stauwehre wohl eher schwierig. Aus technischer Sicht ist ein Mühlgraben da-

hingehend nicht geeignet, da der Durchfluss durch das davor geschaltete Stauwehr gebremst ist. Ökologisch problematisch ist die in einem Mühlgraben ohnehin schon belastete Tierwelt. Eine zweite Belastungsquelle wird von den Behörden und dem Naturschutz nicht gern gesehen. Im Fall der Görbelheimer Mühle ist der Einsatz des Wärmetauschers möglich, da ein Fischpass um den kritischen Bereich herumführt (Fischdurchgängigkeit ermöglicht) und die Fische somit entlastet. (Schemer 2017)

Literaturverzeichnis

- Baumann, Michael; Laue, Hans-Jürgen; Müller, Peter: Wärmepumpen. Heizen mit Umweltenergie. Berlin: Solarpraxis AG.
- Bellack; Heer; Herrmann; Hofmann; Hornemann (2008): Grundlagen für die Beurteilungen von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. 4. Aufl. Hg. v. Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
- Bickel; Susanne (2010): Wo findet man Wasser - Wasserkreislauf. Der Weg des Wassers in der Natur. edYOUnet online Medien. Online verfügbar unter http://www3.hhu.de/biodidaktik/WasserSek_I/wo_findet_man_wasser/dateien/wasserkreislauf.html, zuletzt geprüft am 15.09.2017.
- Borchardt, Steve (2017): Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern. In: Jensen, Jürgen (Hrsg.); 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen.
- Böckh, Peter von; Wetzel, Thomas (2011): Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. 4., bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10455811>.
- Böing, Ekkehart: Der Regionalpark Niddaroute. Radweg durch die Natur- und Kulturlandschaft von der Quelle bis zur Mündung. Stadtverwaltung Karben. Online verfügbar unter <http://www.niddaroute.de/niddaroute/>, zuletzt geprüft am 17.09.2017.
- DWA (2016): Ausbreitungsprobleme von Einleitungen - Prozesse, Methoden und Modelle. - Hennef. Juli 2016. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, M 544,1).
- Feldmann, Peter (2017): Nidda - der Fluss. Stadt Frankfurt am Main. Online verfügbar unter [https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=4628&_ffmpar\[_id_inhalt\]=42097](https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=4628&_ffmpar[_id_inhalt]=42097), zuletzt aktualisiert am 17.09.2017.
- Glatzel, Wolf-Dieter; Heise, Klaus-Dieter (Hg.) (1980): Wärmepumpen und Gewässerschutz. Ökologische Auswirkungen von Wärmepumpen mit Wärmeentzug aus Wasser ; Berichtsband zum Statusseminar am 19. und 20. November 1979 im Reichstagsgebäude in Berlin ; [Tagungsbericht und Auswertung ...]. Deutschland; Statusseminar Wärmepumpen und Gewässerschutz; Wärmepumpen und Gewässerschutz. Berlin: E. Schmidt (IFZ-Forschungsbericht, 90).
- Hartmann, Frank; Schwarzbürger, Heiko (2009): Systemtechnik für Wärmepumpen. Solar- und Umweltwärme für Wohngebäude. München: Hüthig und Pflaum (de-Fachwissen).
- Herwig, Heinz; Moschallski, Andreas (2009): Wärmeübertragung. Physikalische Grundlagen - Illustrierende Beispiele - Übungsaufgaben mit Musterlösungen. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9966-8>.
- Ittershagen, Martin (2017): Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme. Hg. v. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/energieverbrauch-fuer-waerme#textpart-1>, zuletzt geprüft am 03.09.2017.

Jehner, Hansgeorg: Neue Mitte. Die neue Stadtbibliothek (Mediathek). Hg. v. Humanistische Stiftung. Online verfügbar unter <http://www.neue-mitte-bad-vilbel.de/stadtbibliothek/>, zuletzt geprüft am 06.09.2017.

Krohn; Kristek, Lale; Gürtler, Florian (2008): Nidda, Wetter, Kinzig. Rhein-Main-Gebiet. Hg. v. Frankfurter Neue Presse, Societätsverlag, Rhein-Main.Net. Online verfügbar unter <http://www.rhein-main-wiki.de>.

Kugler, Pfister (2013): Das Zürcher Rathaus. Parlamentsdienste des Zürcher Kantonsrates. Online verfügbar unter https://www.kantonsrat.zh.ch/media/8519/rathaus-brosch_re_neuaufgabe_nov2013.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2017.

LfU (2011): Hinweise zu Anhängen 3-12 zur Abwasserverordnung. Köln: Bundesgesetzblatt (BGBl) - Bundesanzeiger Verlag.

Maniak, Ulrich (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05396-2>.

Otto, Andreas: Auswirkungen auf die Gewässertemperatur. Beobachtete Veränderungen der Wassertemperatur in Fließgewässern. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/auswirkungen/ge-waessertemperatur/index.htm.

Sabel, Martin: Wie funktioniert die Wärmepumpe? Wärmepumpe: Geniale Technik - einfach erklärt! Hg. v. Bundesverband Wärmepumpe e.V. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion-waermequellen/>.

Schemer, Rudolf (2017): Wärmepumpenbetreiber an der Wetter; Projektbeispiel an der Wetter. Pers. Mitteilung: Telefonat, 05.09.2017.

Schlag, Elisabeth (2017): Temperaturgrenzwerte und sonstige Daten für Nidda, Wetter und Kinzig, HLNUG, Dezernat Gewässerökologie. Pers. Mitteilung: E-Mail, 23.08.2017.

Schneider, Burkhard (2002): Beeinträchtigungen von FFH-Gebieten. Beeinträchtigungen, Erhaltungs- und Entwicklungsmaßnahmen von Lebensraumtypen und Lebensstätten von Arten zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Baden-Württemberg. Hg. v. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Ministerium Ländlicher Raum Baden-Württemberg. Online verfügbar unter https://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/13940/beeintraechtigung_ffh_gebieten.pdf?command=downloadContent&filename=beeintraechtigung_ffh_gebieten.pdf.

Schwoerbel, Jürgen; Brendelberger, Heinz (2013): Einführung in die Limnologie. 10. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Tholen, Michael; Walker-Hertkorn, Simone (2008): Arbeitshilfen Geothermie. Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen. Bonn: Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser.

Thomas Buch (2017): Einfluss der vorhandenen Wärmepumpe in der Wetter. Untere Wasser- und Bodenschutzbehörde, Fachgebiet für Gewässer. Pers. Mitteilung: Telefonat, 22.08.2017.

Völker, Jeanette; Mohaupt, Volker (2016): Die Wasserrahmenrichtlinie. Deutschlands Gewässer 2015. Hg. v. Umweltbundesamt. Abteilung "Wasser und Boden".

Waldschmidt, Wolfgang (2007): ABC der Wärmepumpe. Frankfurt am Main u.a: VWEW Energieverl. Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3026889&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.

Weinberger, Helmut (2107): Dynamische Karte. Gewässergüte, Fischgemeinschaften. Hg. v. Hessisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Online verfügbar unter www.wrrl.hessen.de, zuletzt geprüft am 15.09.2017.

Weinberger, Helmut (2017): Dynamische Karte. Wasserstand, Wassertemperatur, Durchfluss. Hg. v. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). Online verfügbar unter <http://www.hlnug.de/static/pegel/wiskiweb2/>, zuletzt geprüft am 15.09.2017.

Erklärung

Abschlussarbeit von

Frau Jessika Gappisch

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden.

Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 29.09.2017

Unterschrift